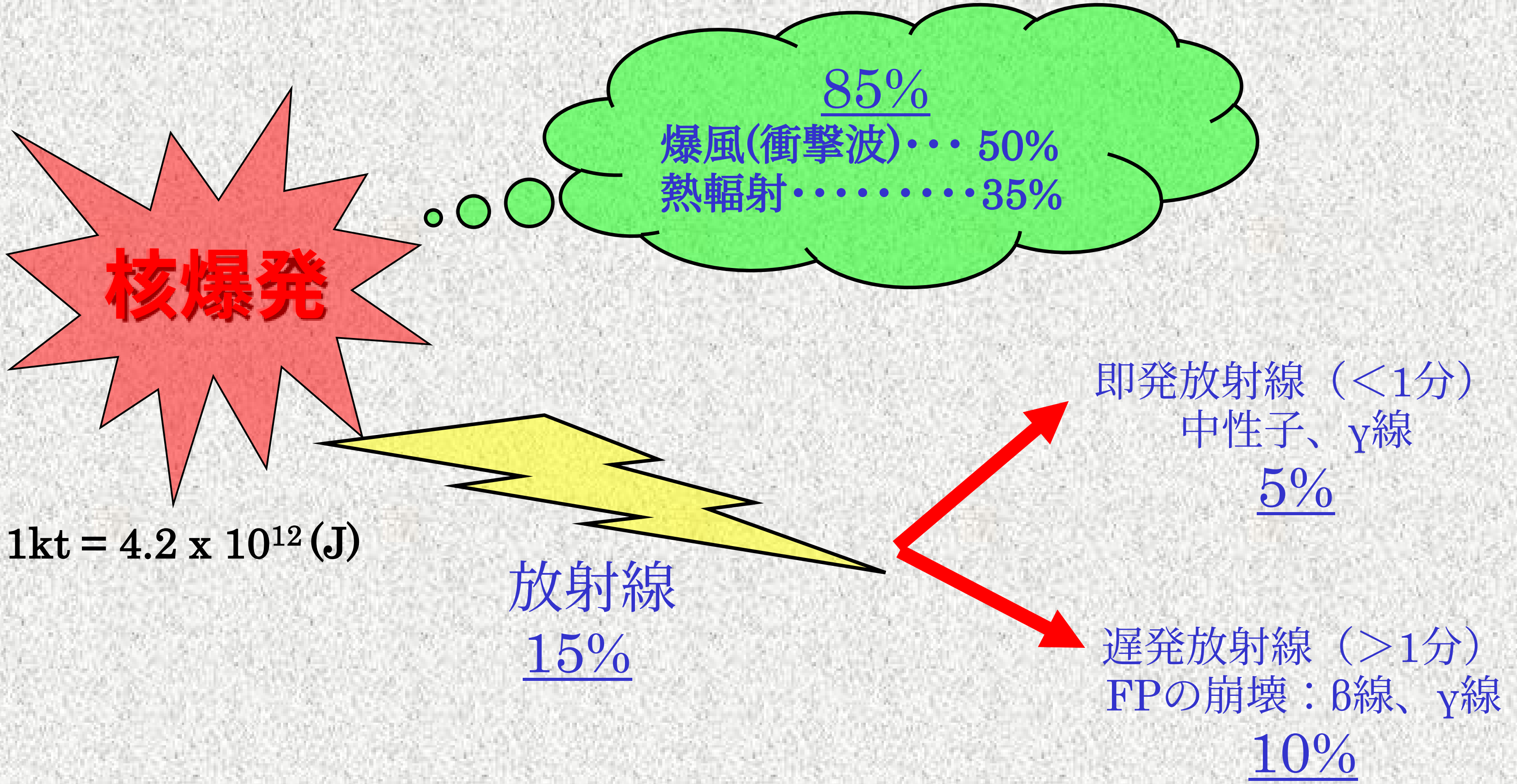
Jun 9, 2009

包括的核実験禁止条約(CTBT)にかかわるシンポジウム

核実験監視に係る放射性核種監視の現状

(独) 日本原子力研究開発機構
核不拡散科学技術センター
小田 哲三

核爆発エネルギー



85%
爆風(衝撃波)・・・50%
熱輻射・・・・・・・・・35%
核爆発
1kt = 4.2 x 10^{12} (J)
放射線
15%
即発放射線（＜1分）
中性子、γ線
5%
遅発放射線（＞1分）
FPの崩壊：β線、γ線
10%

A vented underground nuclear test



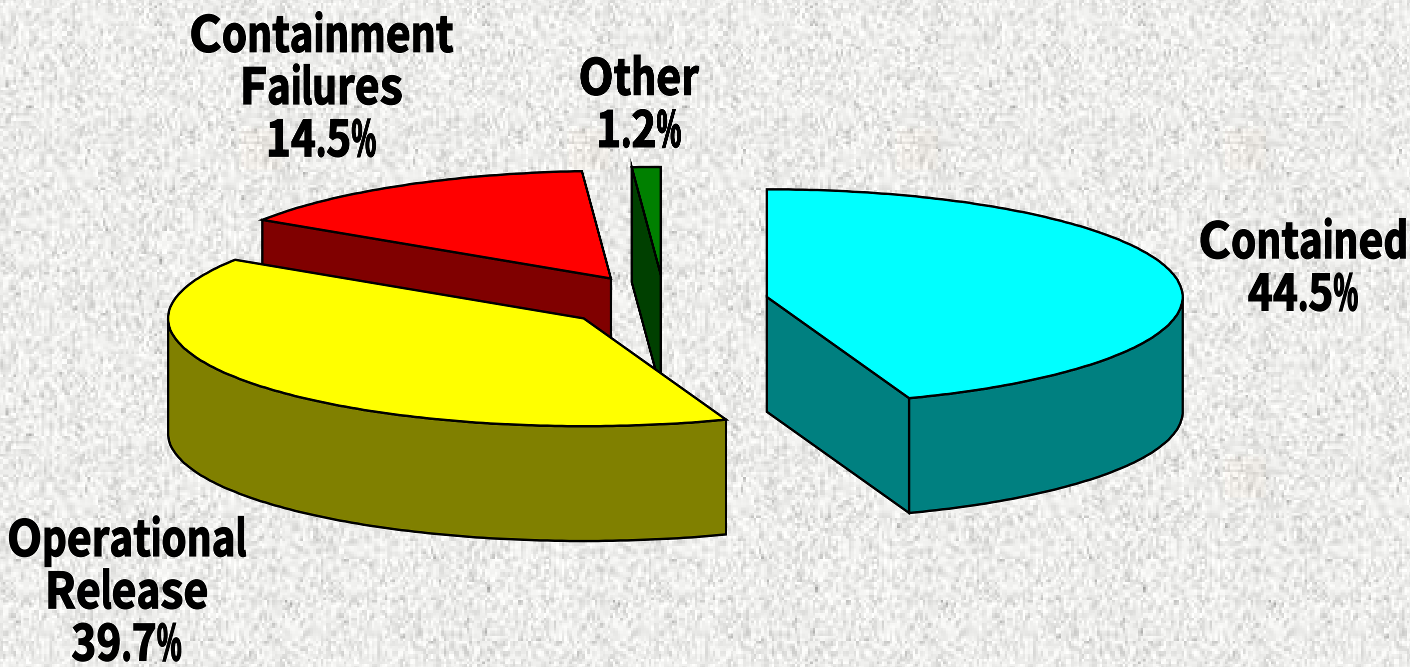
放射能閉じ込めの失敗例

Test: Baneberry
Time: 15:30.00.20 (GMT)
18 December 1970
Location: NTS, Area 8d
Test Height and Type:
Shaft, -270 m, Yield: 10 kt
RN release: 6.7 MCi (12hr後)
全生成量の6%
^{131}I : 80 kCi

約3000m上空まで放射性物質が舞い上がったと言われている。

出典：米DOEネバダ実験場（http://www.nv.doe.gov/nts/default.htm ）

PTBT（1963年）後に実施された米国の地下核実験（723回）における放射能閉じ込め割合



出典：“Radiological Effluents Released from Announced U.S. Continental Tests 1961 Through 1992”, DOE/NV-317/Rev.1 (1996)

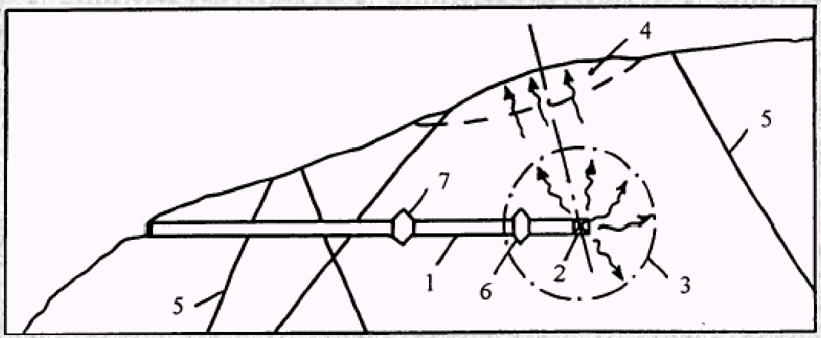
米国の地下核実験における放射能放出例

原　因	実験名	年	規模(kt)	深さ(ft)	放出量(Ci)
閉じ込め失敗、 土木工事実験など 放出量は実験から12時間後の補正値	PLATTE	1962	1.85	560	1,900,000
	EEL	1962	4.5	714	1,900,000
	DES MOINES	1962	2.9	660	11,000,000
	SEDAN	1962	104	635	15,000,000
	BANEBERRY	1970	10	912	6,700,000
	CAMPHOR	1971	<20	1390	360
	DIAGNONAL LINE	1971	<20	867	6,800
	RIOLA	1980	1.07	1391	3,100
	AGRINI	1984	<20	1050	690
亀裂からの時間遅れの漏洩	TIERRA	1984	20-150	2100	600
実験の一環としての実験坑換気や掘削サンプリング	HYBLA FAIR	1974	<20	1325	500
	HURON LANDING	1982	<20	1340	280
	MIGHTY OAK	1986	<20	1294	38,000
大気中実験（1kt, 12時間後）	ー	ー	1	0	10,000,000
チェルノブイル事故	ー	1986		0	～81,000,000

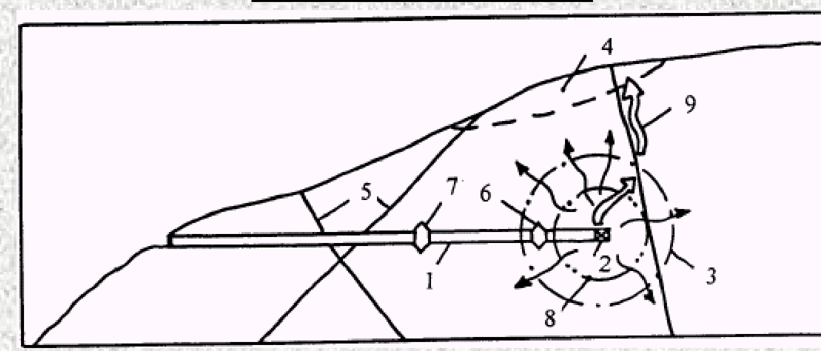
出典：“The Containment of Underground Nuclear Explosions”, OTA-ISC-414 (1989)
“Radiological Effluents Released from Announced U.S. Continental Tests 1961 Through 1992”, DOE/NV-317/Rev.1 (1996)

地下核実験（トンネル型）による
放射性ガスの漏洩経路

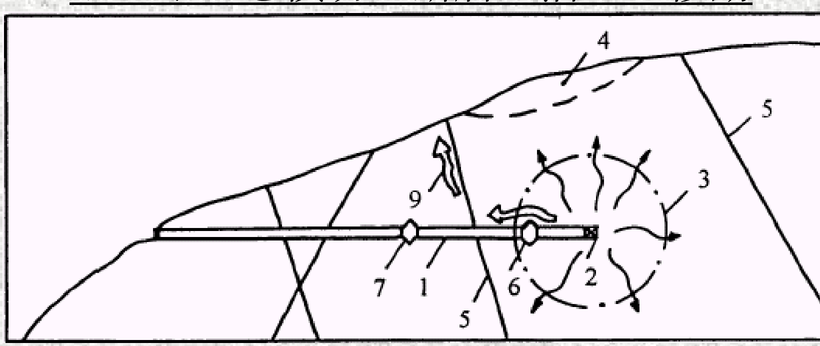
岩盤母体中の移動



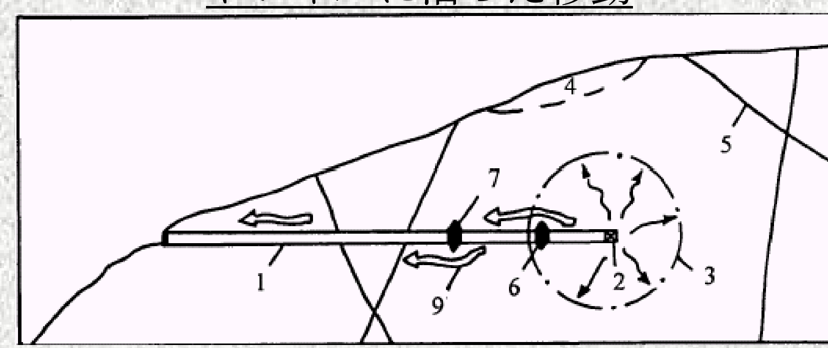
断層に沿った移動



トンネルを横切る断層に沿った移動



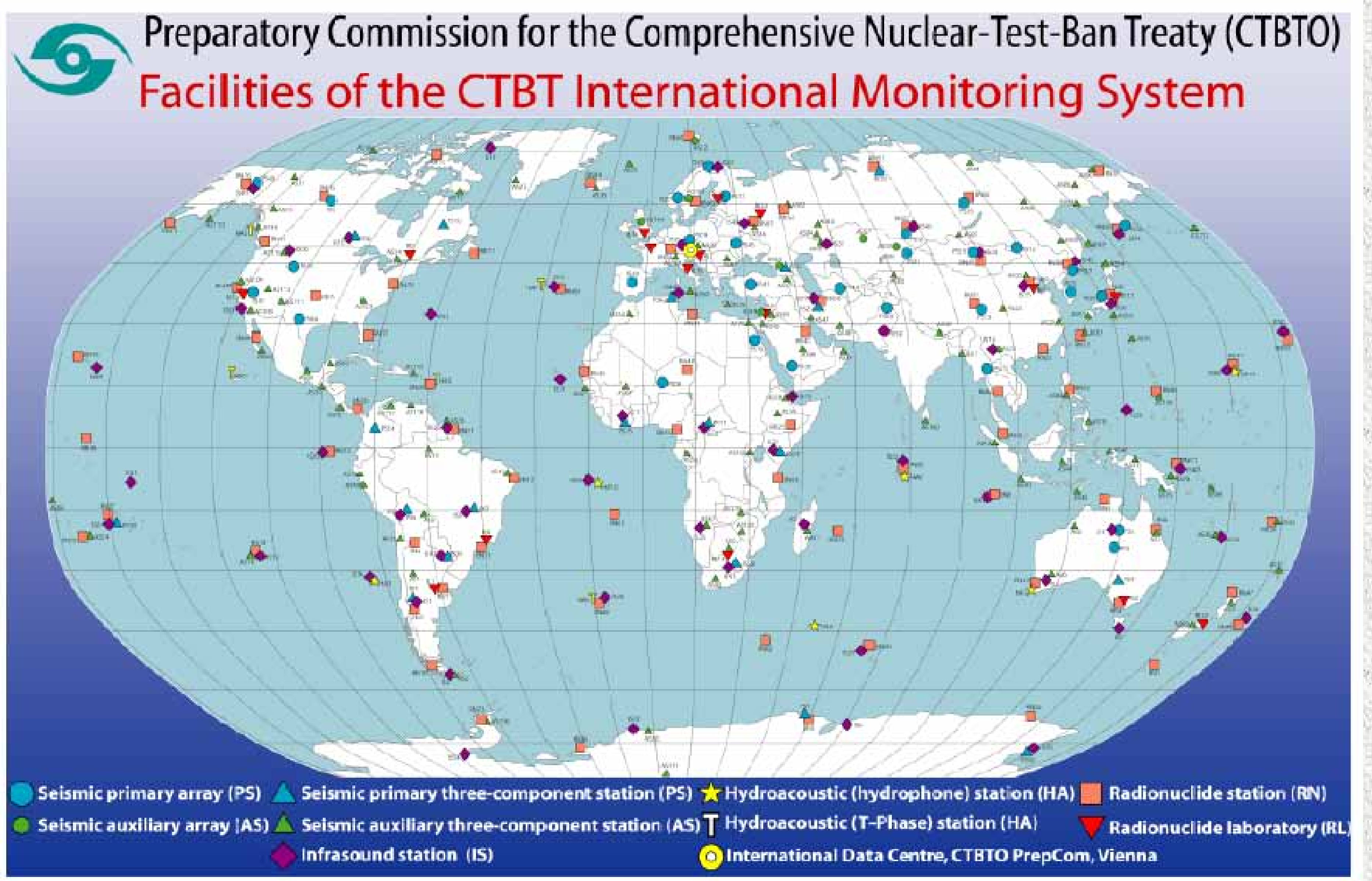
トンネルに沿った移動



1- トンネル； 2- 爆発位置； 3- 岩盤損傷範囲； 4- 破砕ゾーン； 5- 断層； 6, 7- 接続部；
8- 岩盤母体を通して気体が移動する範囲； 9- 断層やトンネルに沿った気体の移動

出典：“The Containment of Soviet Underground Nuclear Explosions”, USGS Open File Report 01-312 (2001)

世界337カ所の観測所ネットワーク

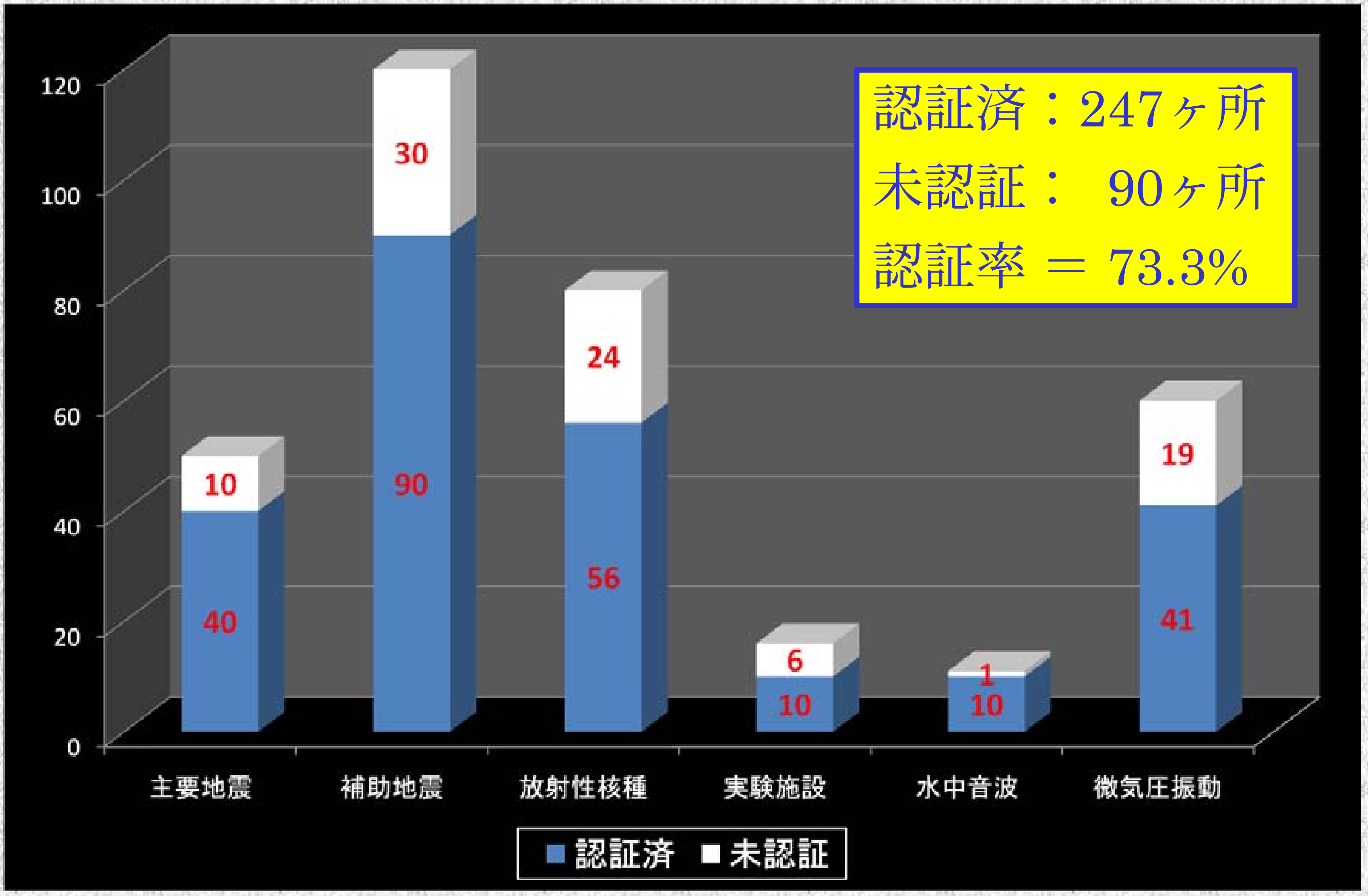


CTBT検証制度の設計指針

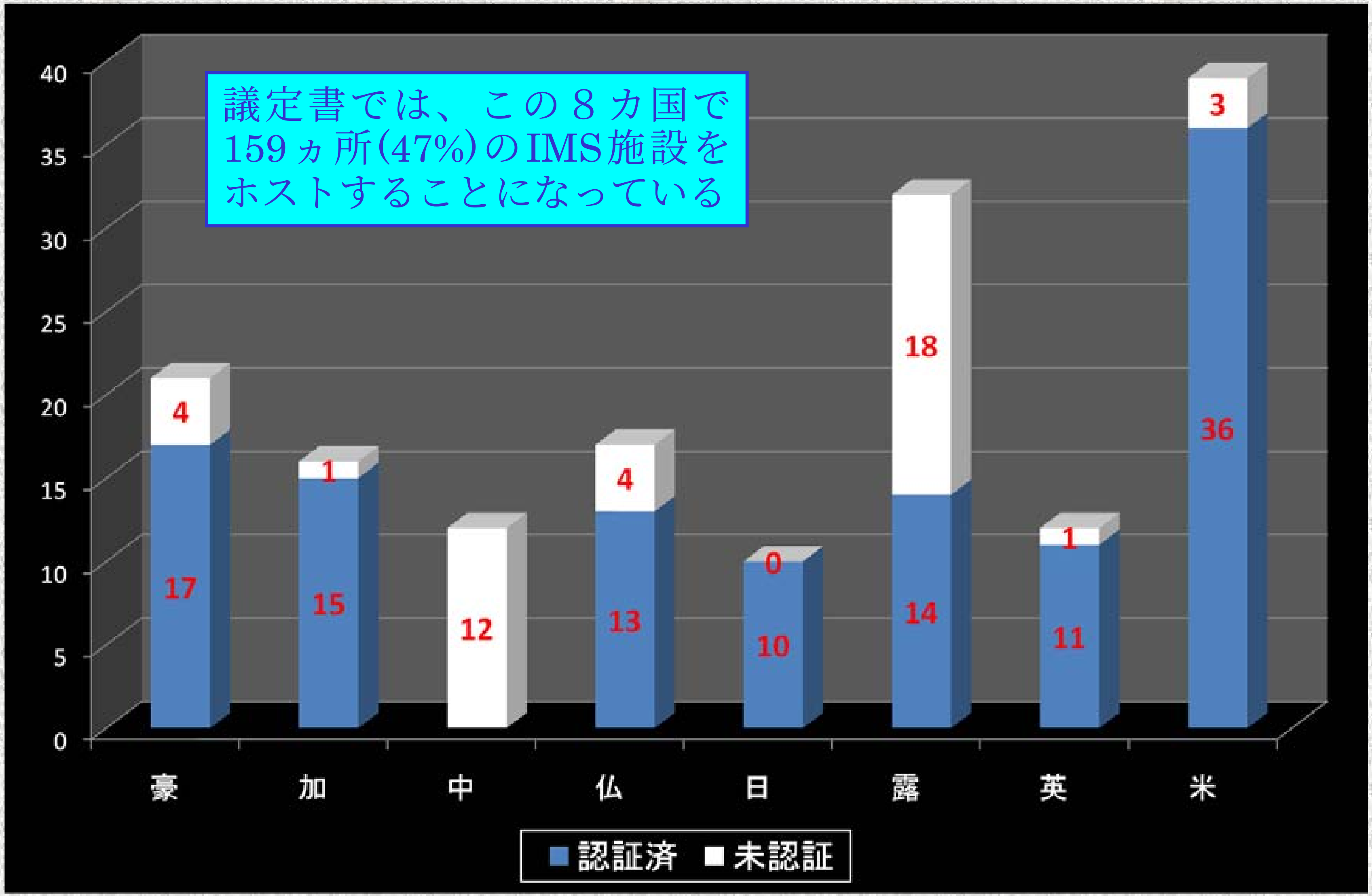
- 地球上のあらゆる場所における核爆発も高い確率で検知可能なこと
  - 大気中、水中、地下
  - 高検知確率：90～95%以上
  - 最近実施された核実験か？
  - 位置精度：1000km^{2}以内
  - 費用対効果：＞1 kt(TNT換算) = 57g-^{235}Uの核分裂

- 各締約国が条約遵守について評価できるようにデータを提供する
  - 平等性、適時性

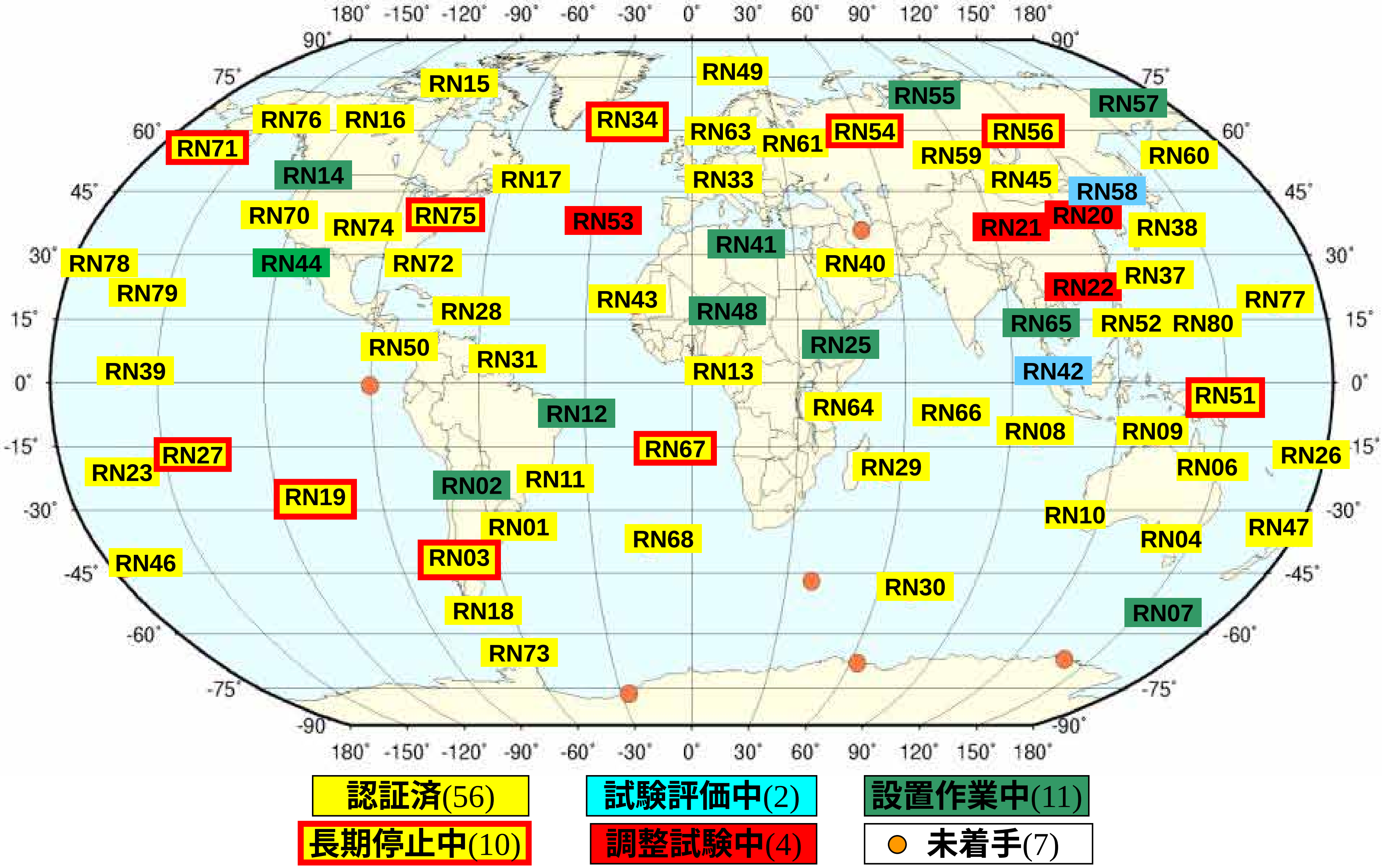
IMS技術別の認証数
(2009年6月現在)



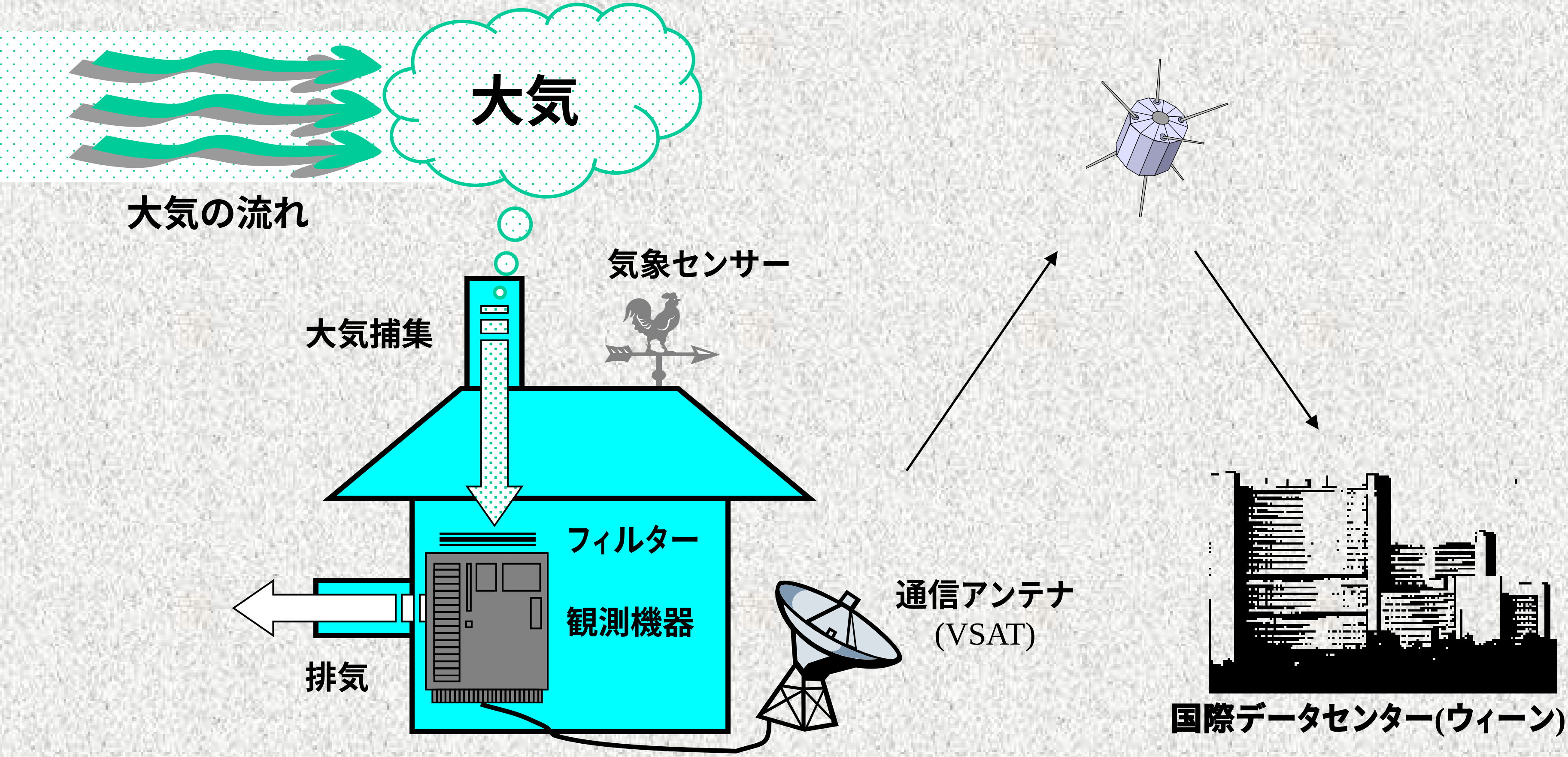
主な国のIMS施設の認証数
(2009年6月現在)



整備/稼働中の放射性核種観測所(2009年 6月現在)



CTBT放射性核種監視観測所の役割



① 空気中の塵（微粒子）をフィルターで集め、大気中の環境放射能を測定

② 観測データを国際データセンターに送信

CTBT/IMSデータの特徴
－放射性核種－

Ø 地球規模　観測所：80カ所（粒子）＋40カ所（Xe）
公認実験施設：16カ所

Ø 高頻度　毎日(availability:>95%)

Ø 低検出限界　10 〜 30 mBq/m^3 for ^{140}Ba
0.2〜0.3 mBq/m^3 for ^{133}Xe

Ø 高分解能　HPGe及びb-g同時計数法による測定

Ø 品質管理　国際機関による認証
統一されたマニュアルと品質管理システム
確立された報告システム

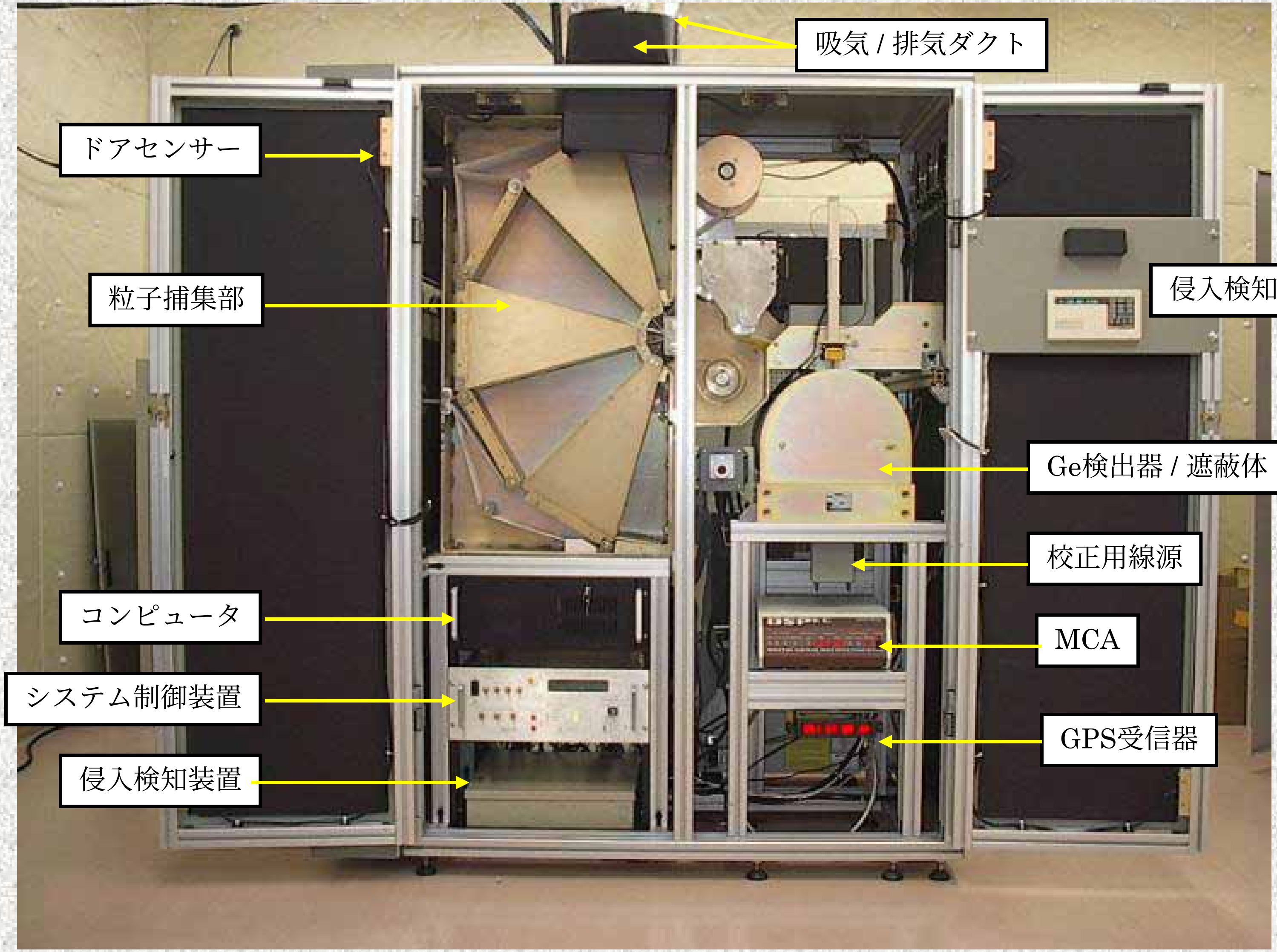
Ø 付随データ　気象データ、検出器データ etc

Ø その他　フィルター試料の提供
→　非放射性物質等の分析も可

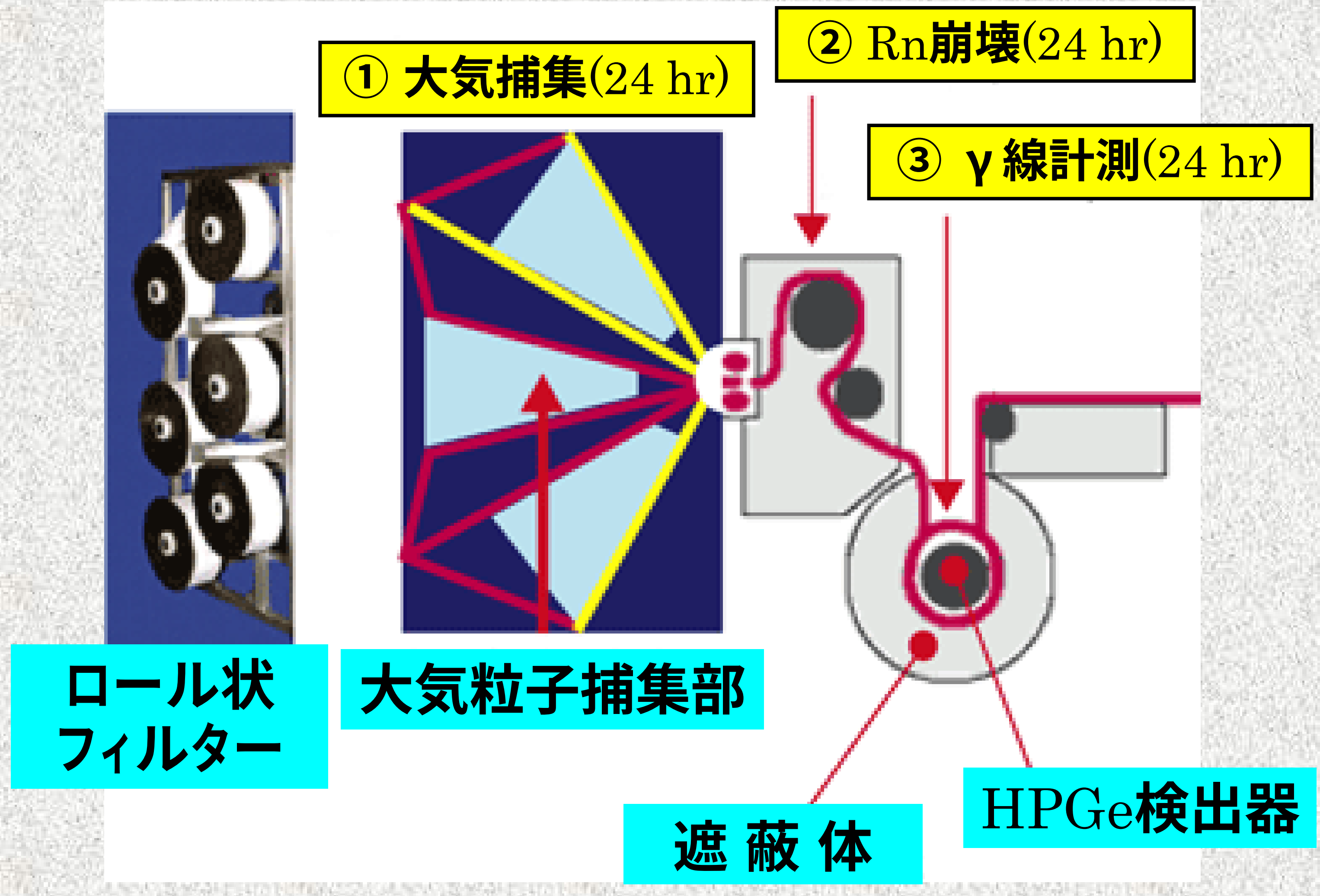
高崎観測所(RN38)室内



全自動放射性粒子モニタリング装置(RASA)

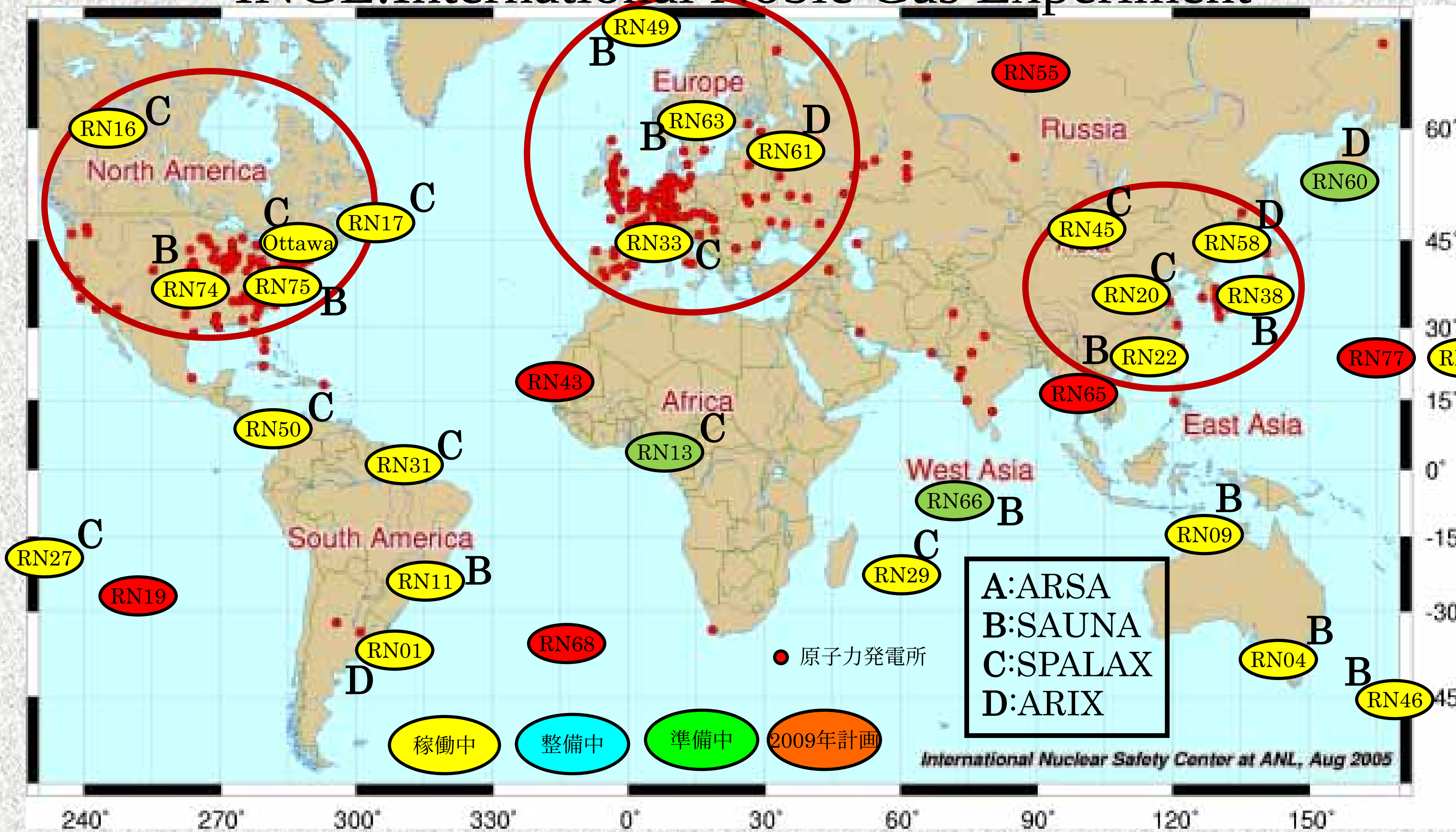


RASAの捕集および測定メカニズムの概略



国際希ガス試験 (Phase IIIc)

INGE:International Noble Gas Experiment



① 原子力活動密度の高い３地域でのバックグラウンド挙動と観測所相関データを得る
② バックグラウンド挙動の未知な赤道～南半球での観測データを得る

希ガスモニタリング装置

ARIX-4
ロシア
(KRI)
β- coincidence γ



SAUNA-II
スウェーデン
(FOI)
β-coincidence γ



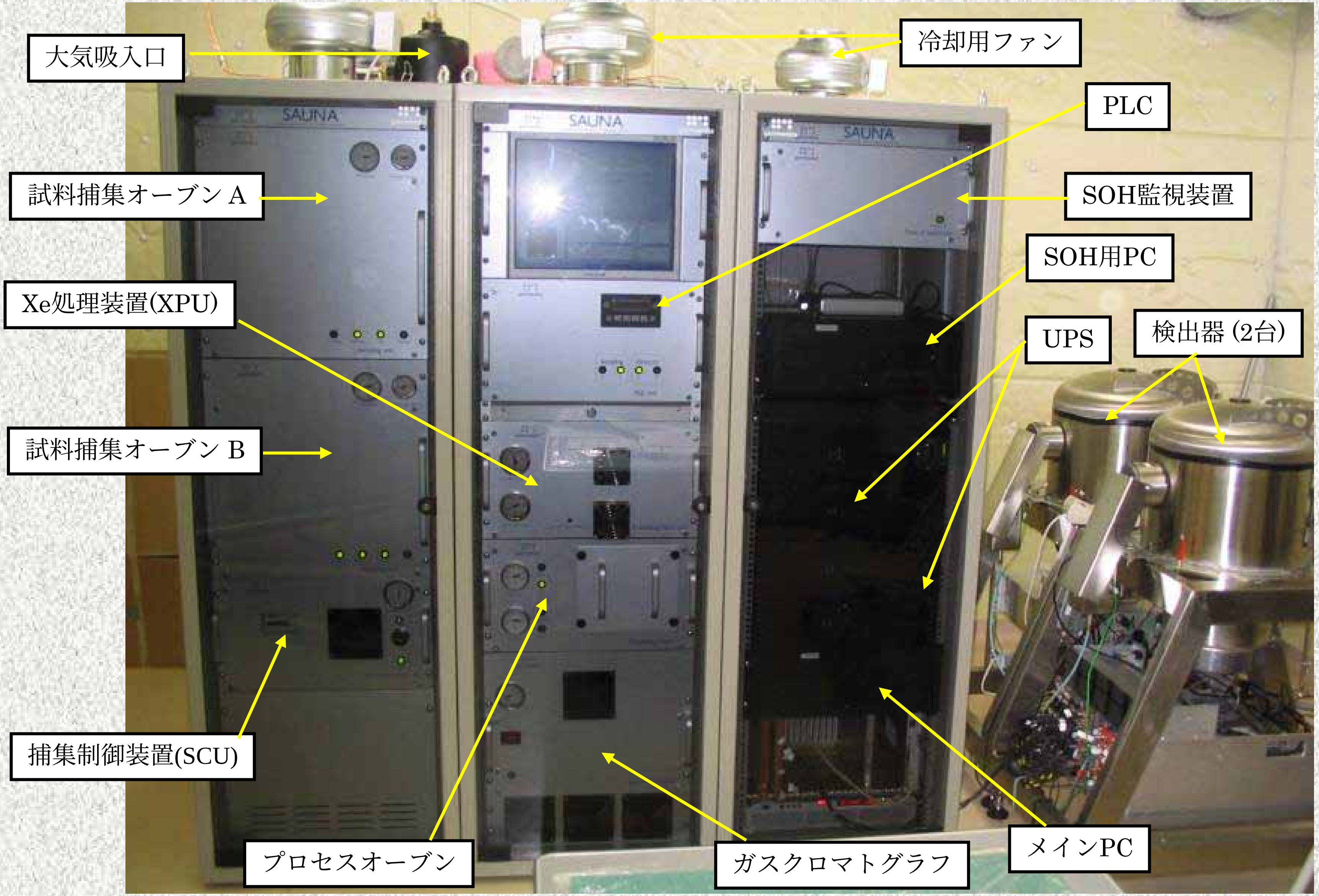
SPALAX
フランス
(CEA/DASE)
HRGS



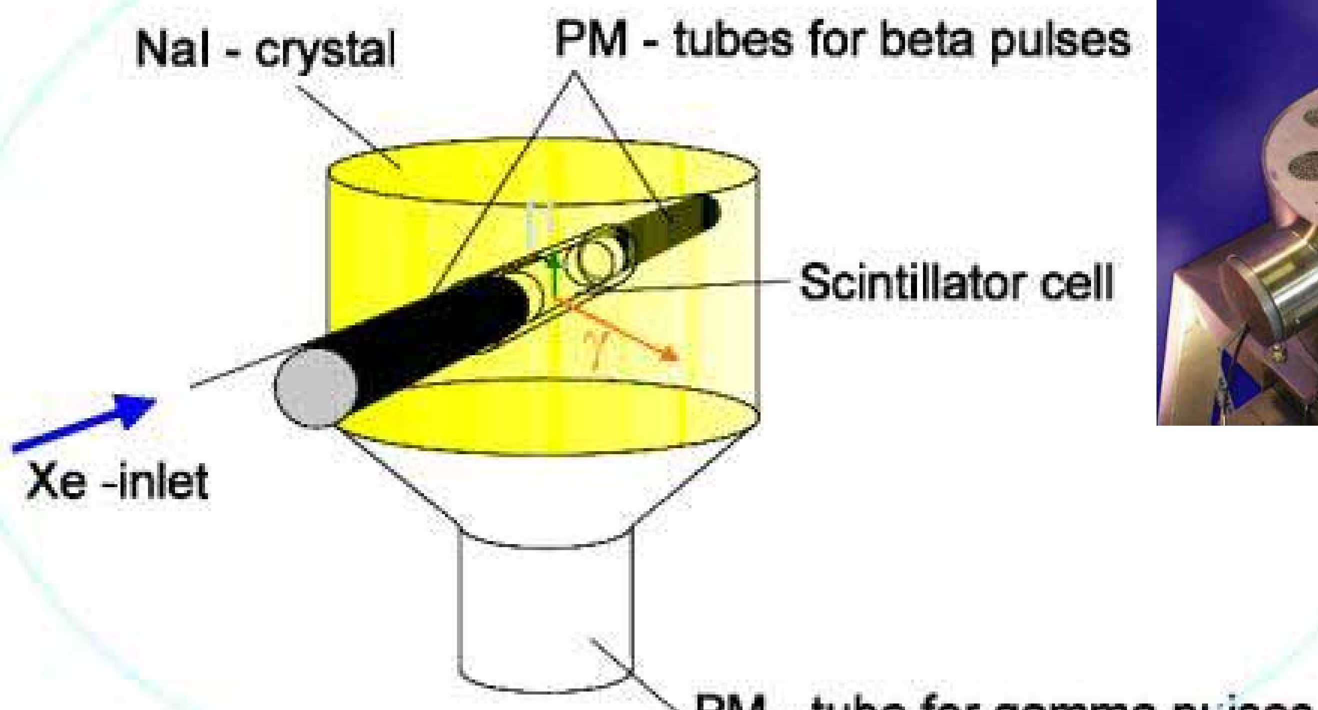
ARSA
米国
(PNNL)
β-coincidence γ

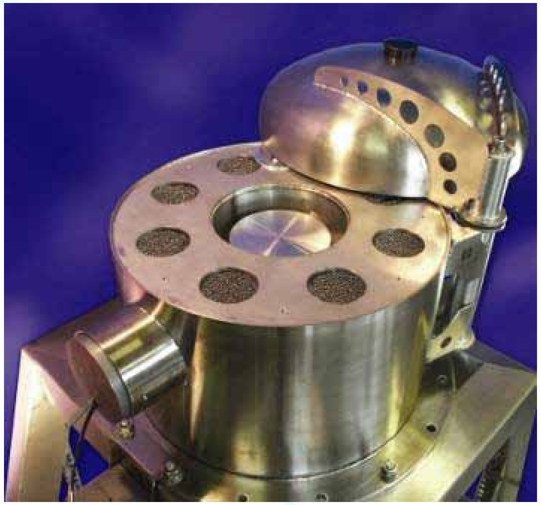


希ガス観測装置 (SAUNA-II)

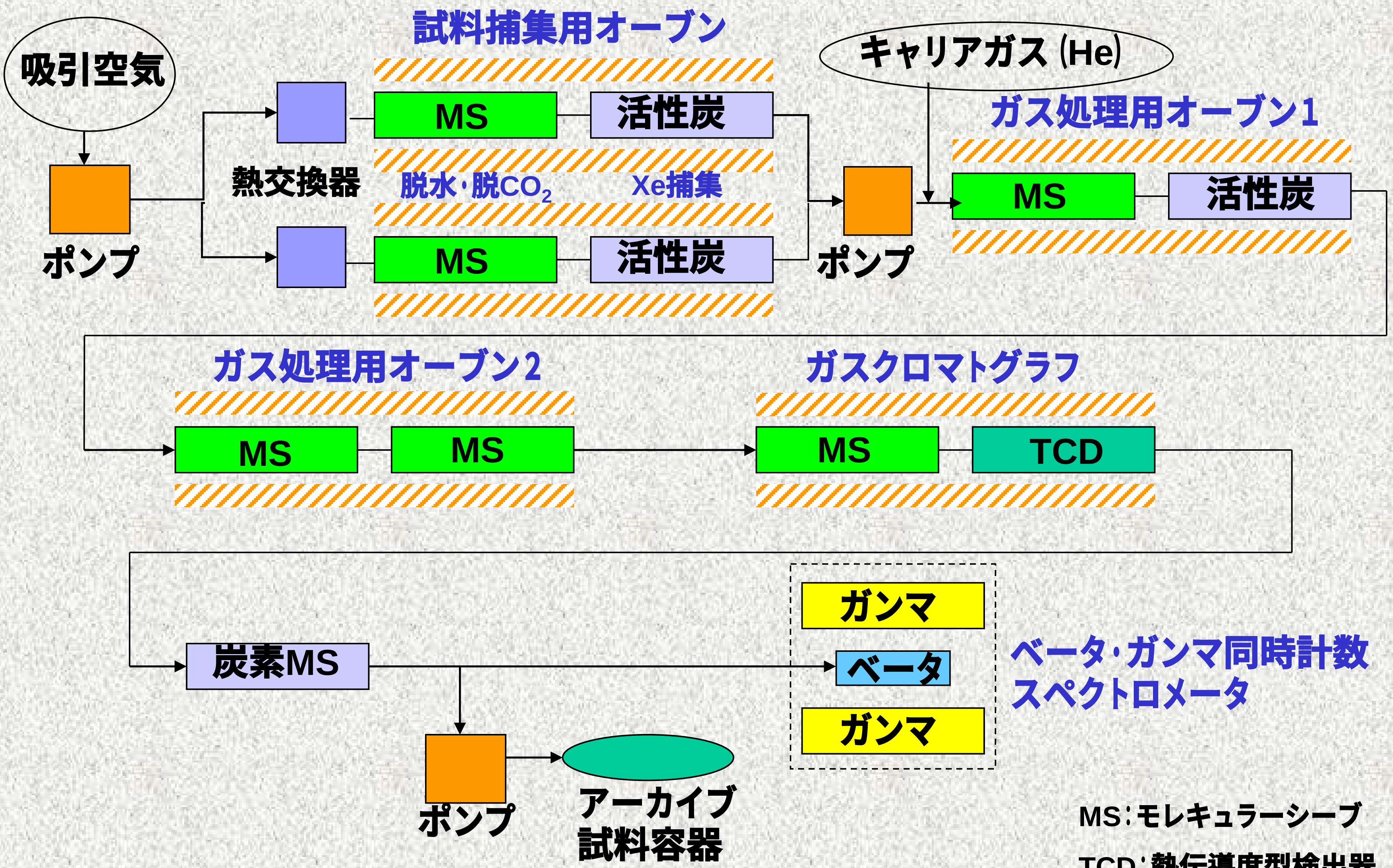


SAUNA-II の検出器

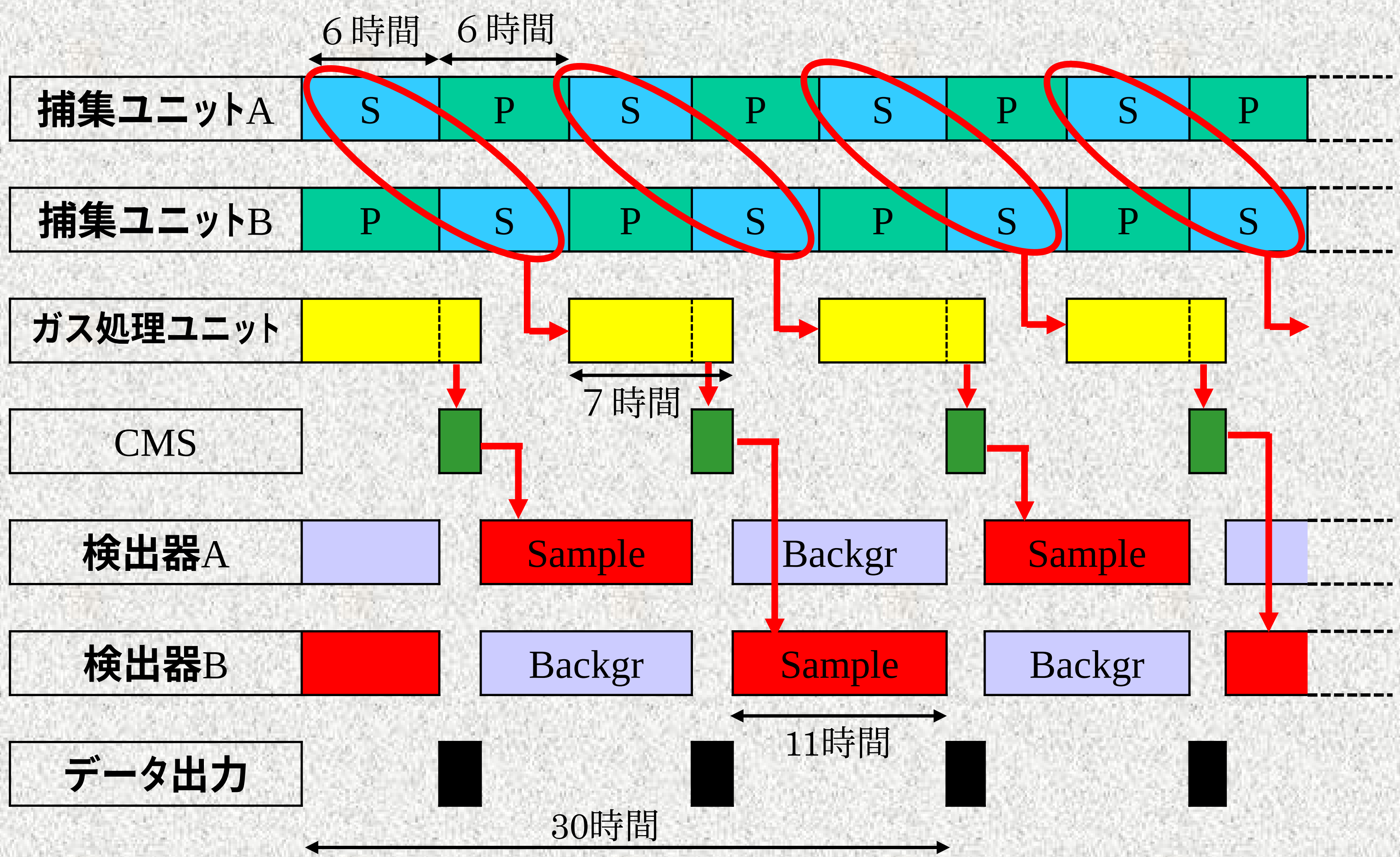




SAUNA-II の構成図



SAUNA-II の処理プロセス



大気捕集開始から30時間でFULLデータが出る。データ頻度は12時間毎。

SAUNA-II のアーカイブ容器



容量：500 ml

本数：６本

Ø12時間毎にアーカイブされるため、試料は3日間保持される。
Ø必要に応じて、詳細分析のため実験施設へ送られる。

大気中放射性Xeの主な発生源

	Xe-131m	Xe-133m	Xe-133g	Xe-135
核実験		X	X	X
原子炉			X	X (注)
再処理	X			
医療用	X		X	

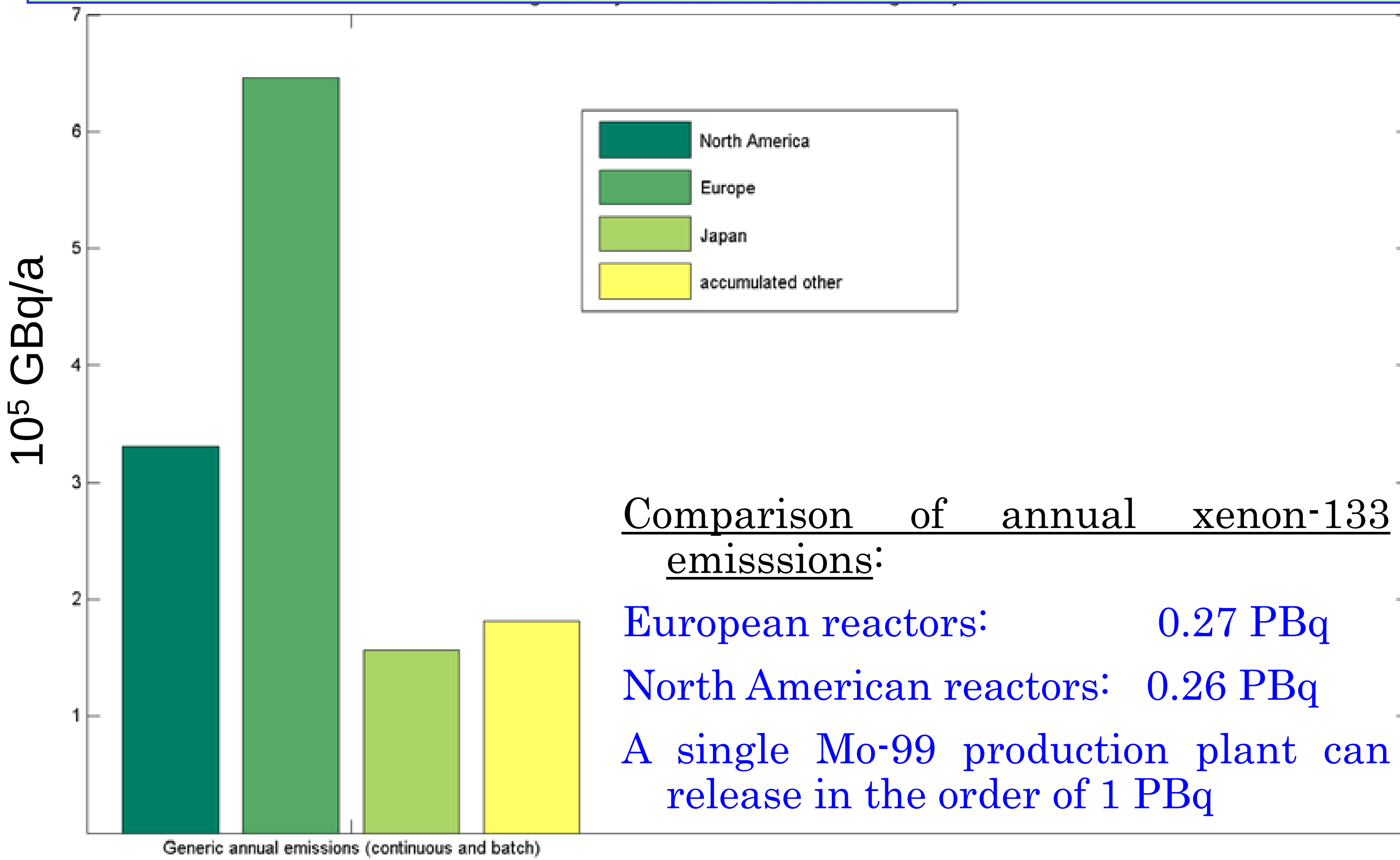
注）原子炉の起動／停止時など

^{133}Xeの放出量比較

Type of Release	Amount (TBq)
One medical application	0.000074 – 0.0011
Large reprocessing plant (per day)	up to about 0.0003
Single reactor (average per day)	0.005
Single reactor site (average per day)	0.01
Largest total reactor release ever reported (per day)	1.84
Single reactor pulse release (average per pulse)	0.004
Largest quarterly batch average reported (for a single pulse)	1.1
Large isotope production plant (per day)	3 – 14
Atmospheric 1 kt nuclear explosion	10000
Underground 1 kt nuclear explosion (1% release)	100

出典：**Kalinowski, M.B.et al, J. Environ. Radioactivity <u>100</u>, 58-70 (2009)**

放射性Xe放出量の地域比較
ー131m,133m,133g,135の合計ー



<u>Comparison of annual xenon-133 emisssions</u>:

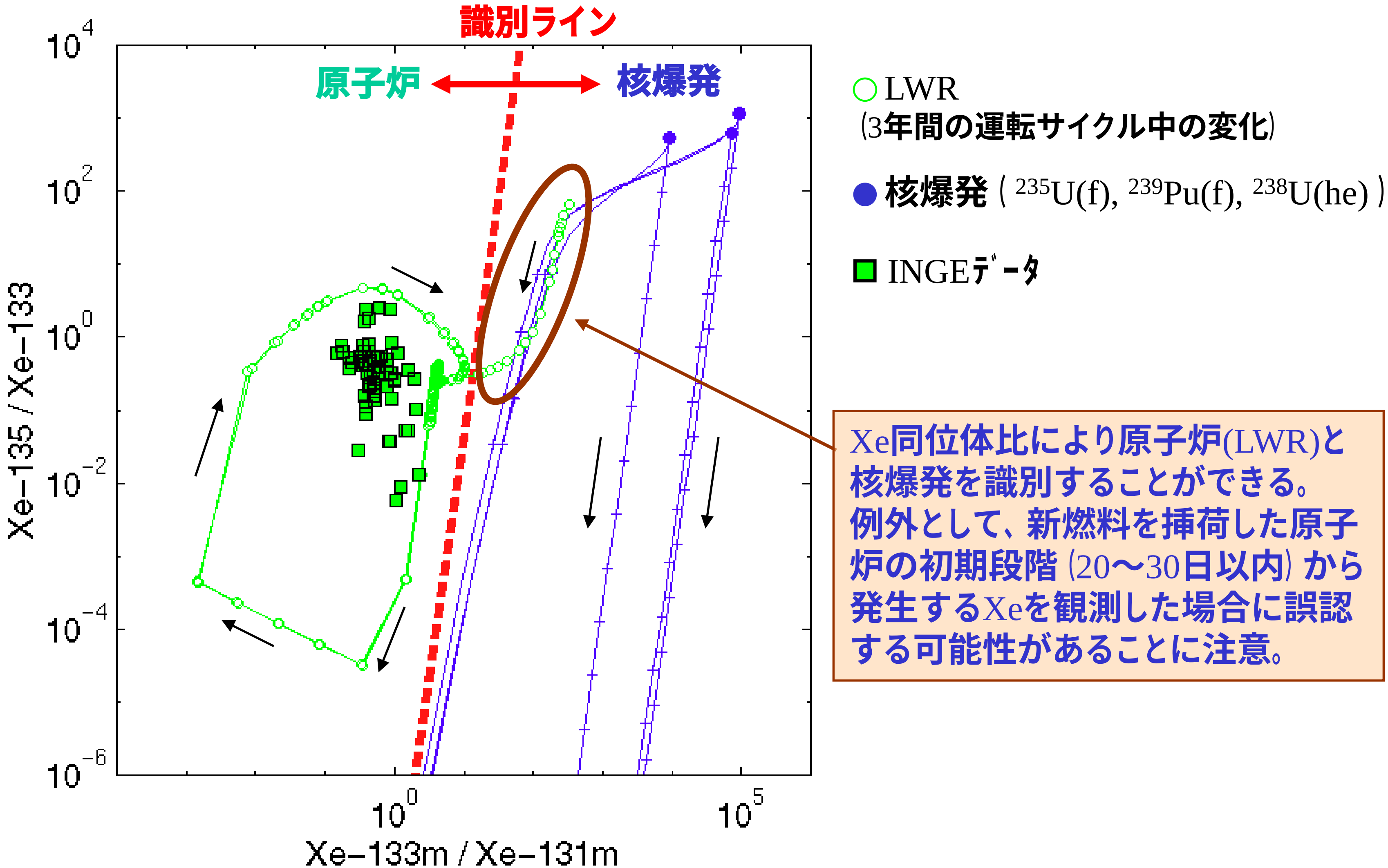
European reactors: 0.27 PBq

North American reactors: 0.26 PBq

A single Mo-99 production plant can release in the order of 1 PBq

出典：Tuma, M. et al, EGU2007-A-00380 (2007)

Xe同位体比による識別



Xe同位体比により原子炉(LWR)と核爆発を識別することができる。例外として、新燃料を挿荷した原子炉の初期段階（20〜30日以内）から発生するXeを観測した場合に誤認する可能性があることに注意。

出典：Kalinowski, M.B.et al, ACDIS Research Report (2005)
Kalinowski, M.B.et al, J. Environ. Radioactivity 88 (2006) 215-235

公認実験施設の役割

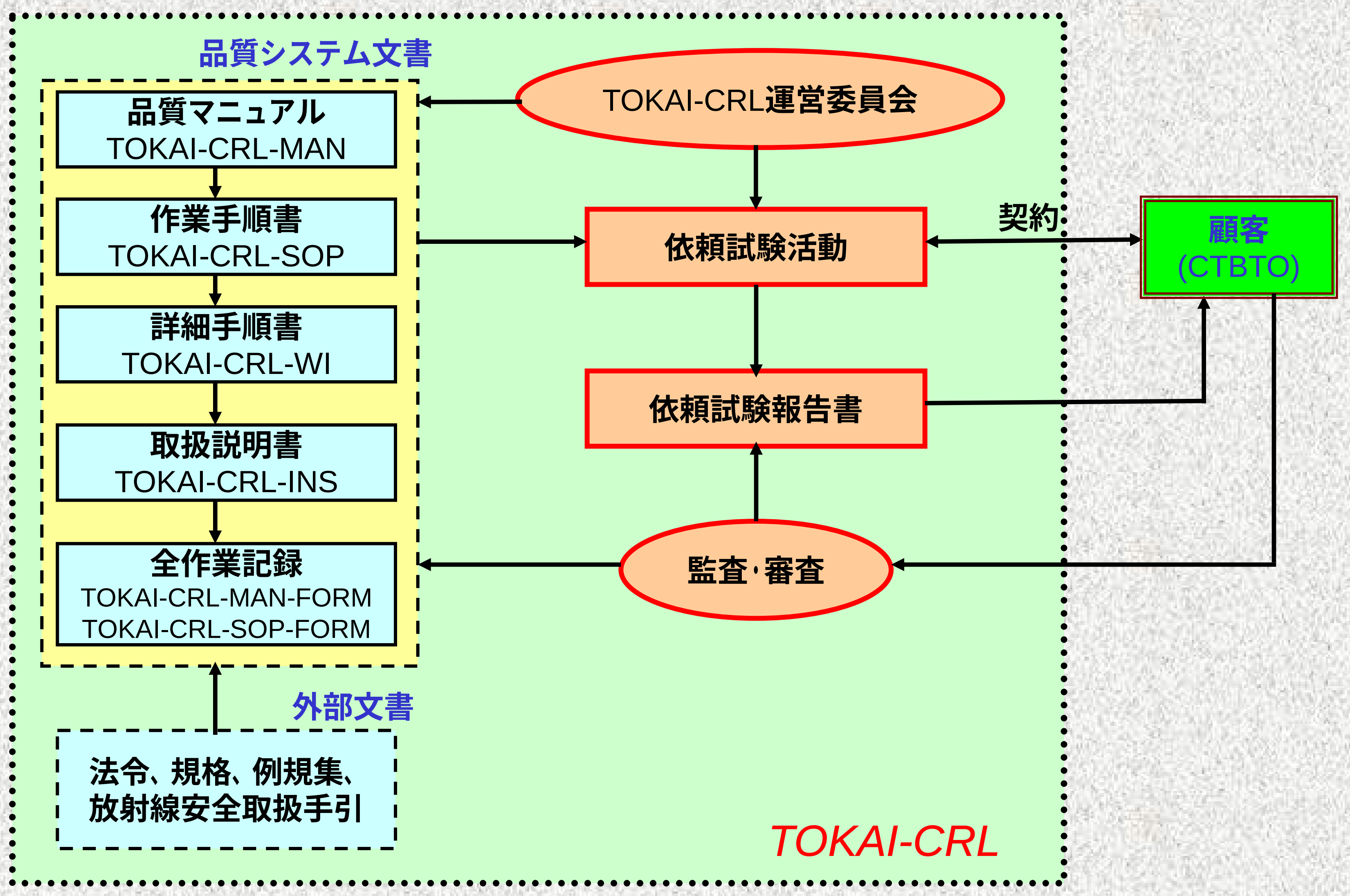
- サンプルの詳細分析
- 観測所の支援 (QA/QC、バックアップ)
- 分析技術の研究開発
- 標準試料の作成
- その他

東海公認実験施設 (JPL11) 室内
原子力機構東海研究開発センター 研究1棟028号室

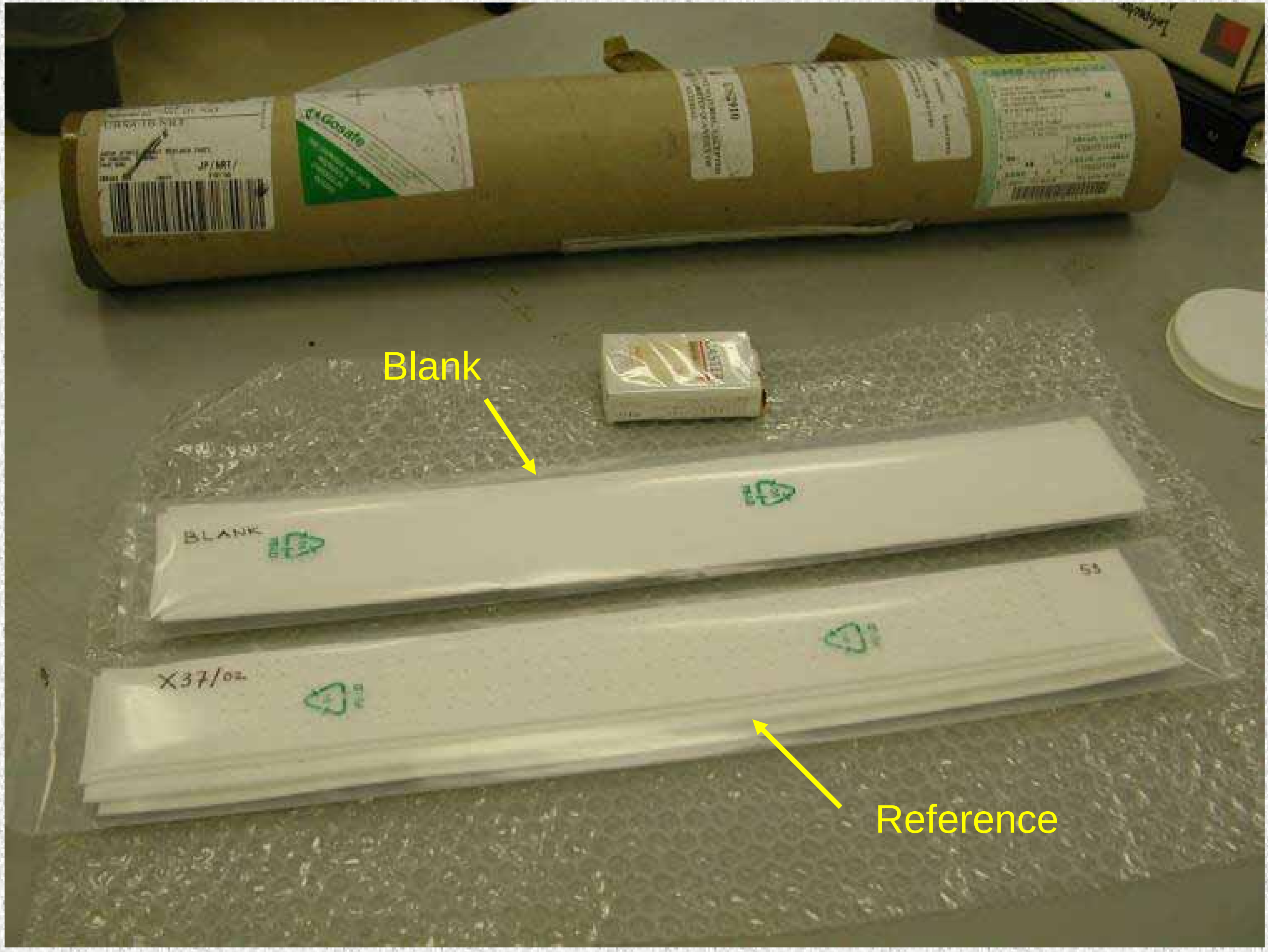


東海公認実験施設の品質システム

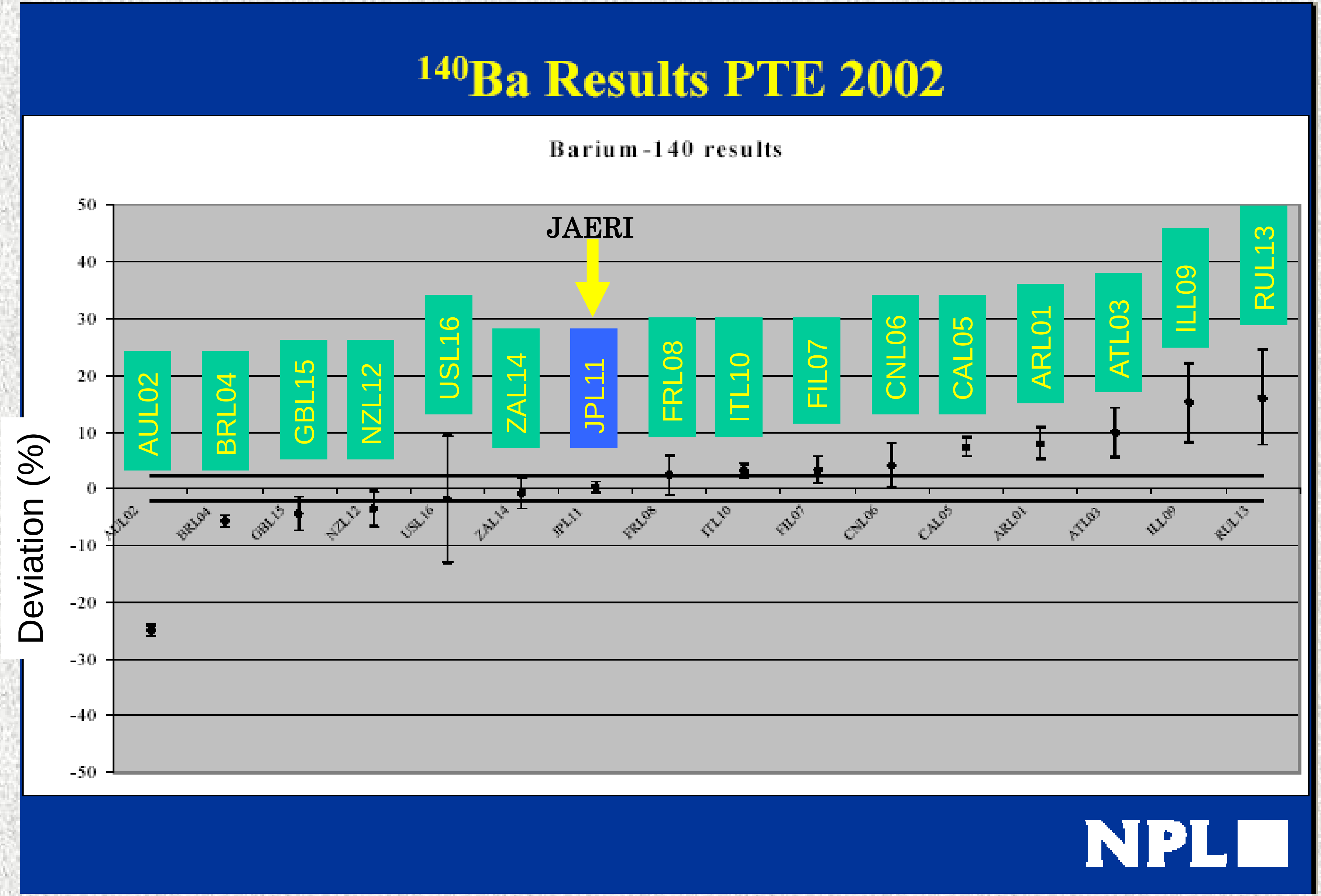
ISO/IEC 17025 及び CTBT/PTS/INF.96/Rev.7 に準拠



国際比較試験のために送られてきた模擬フィルター試料 (RASA filter)



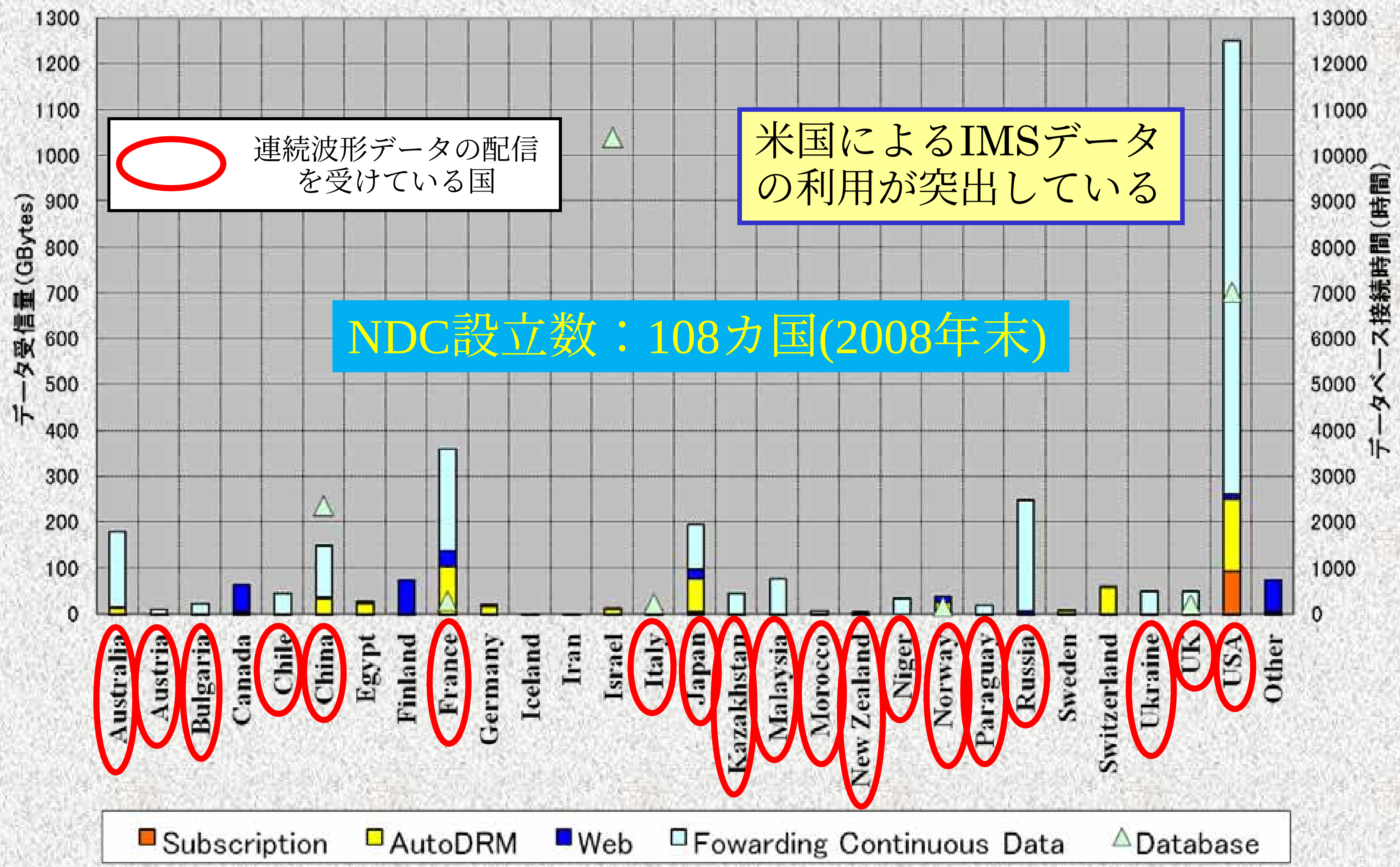
国際比較試験結果の一例（Ba-140の定量）



国内データセンタ(NDC)

- 国内の検証制度に係わる中心的機能
  - データの受信･配布
  - データ解析･評価
  - 国内観測所の品質維持
- 国際検証制度の能力に対する技術的評価
- 各国との共同プログラム
- 科学技術、災害監視等への貢献

各国NDCのIDCアクセス統計 (2008年)

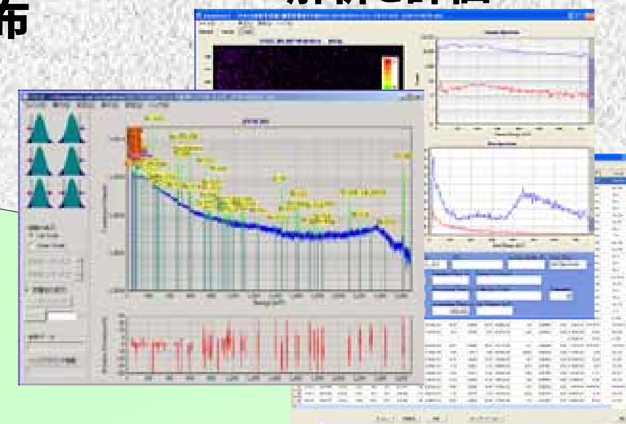


JAEA NDCの役割

IMS観測データとIDCプロダクトの
受信と配布／NDCプロダクトの配布



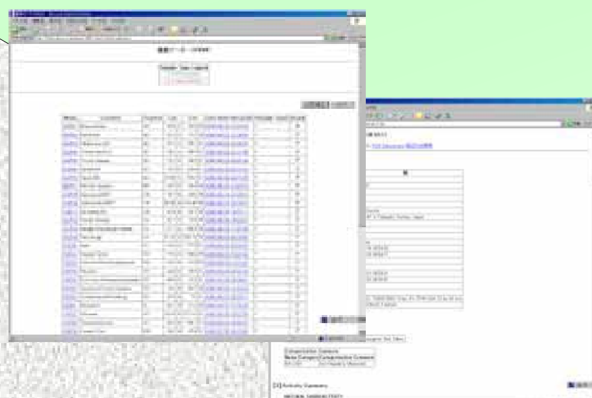
放射性核種データの
解析と評価



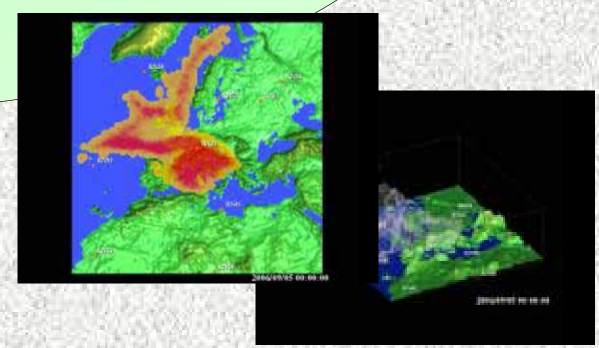


NDCシステムの
構築と運用

JAEA/NDC

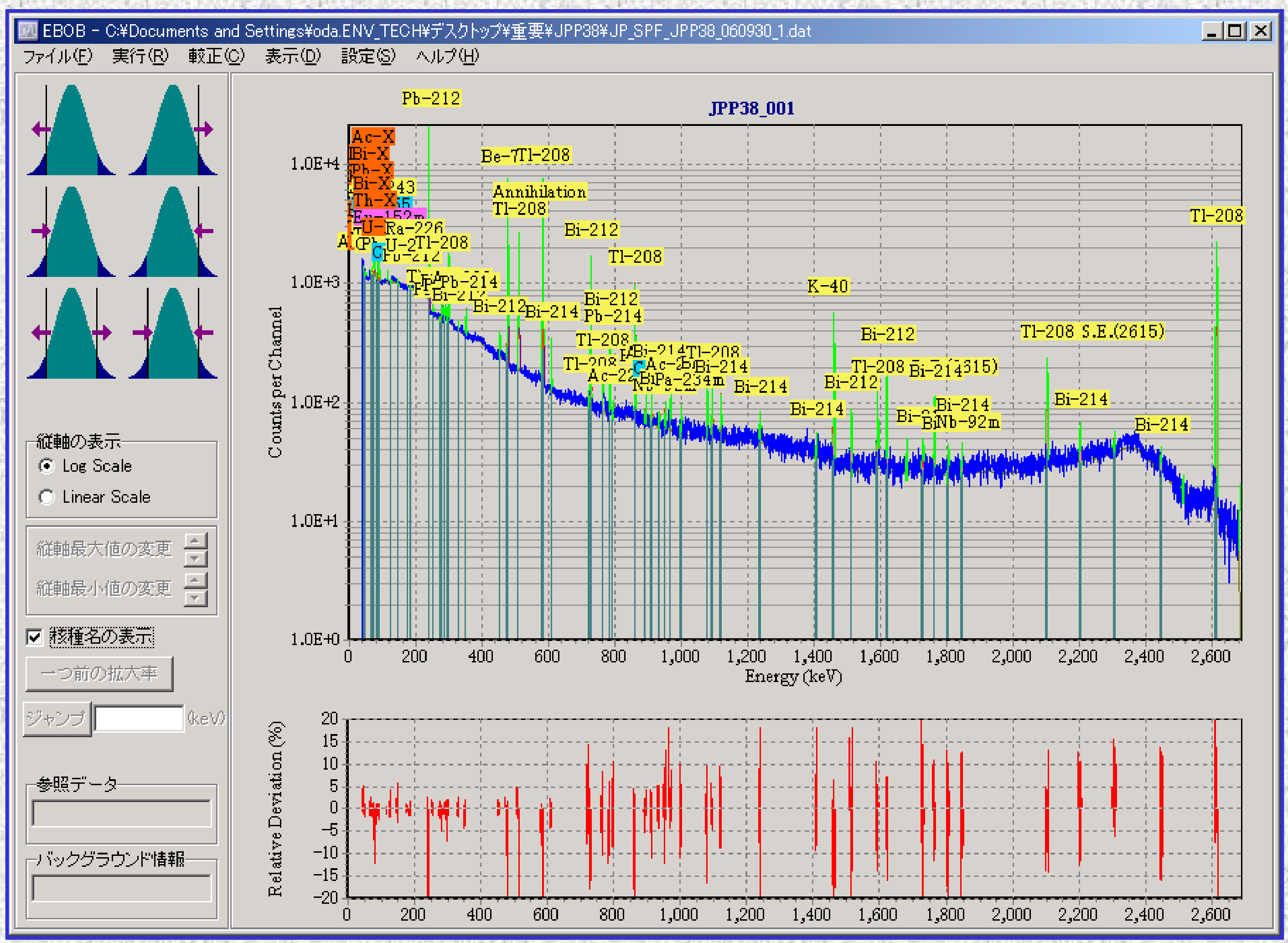


データベースの
開発と運用



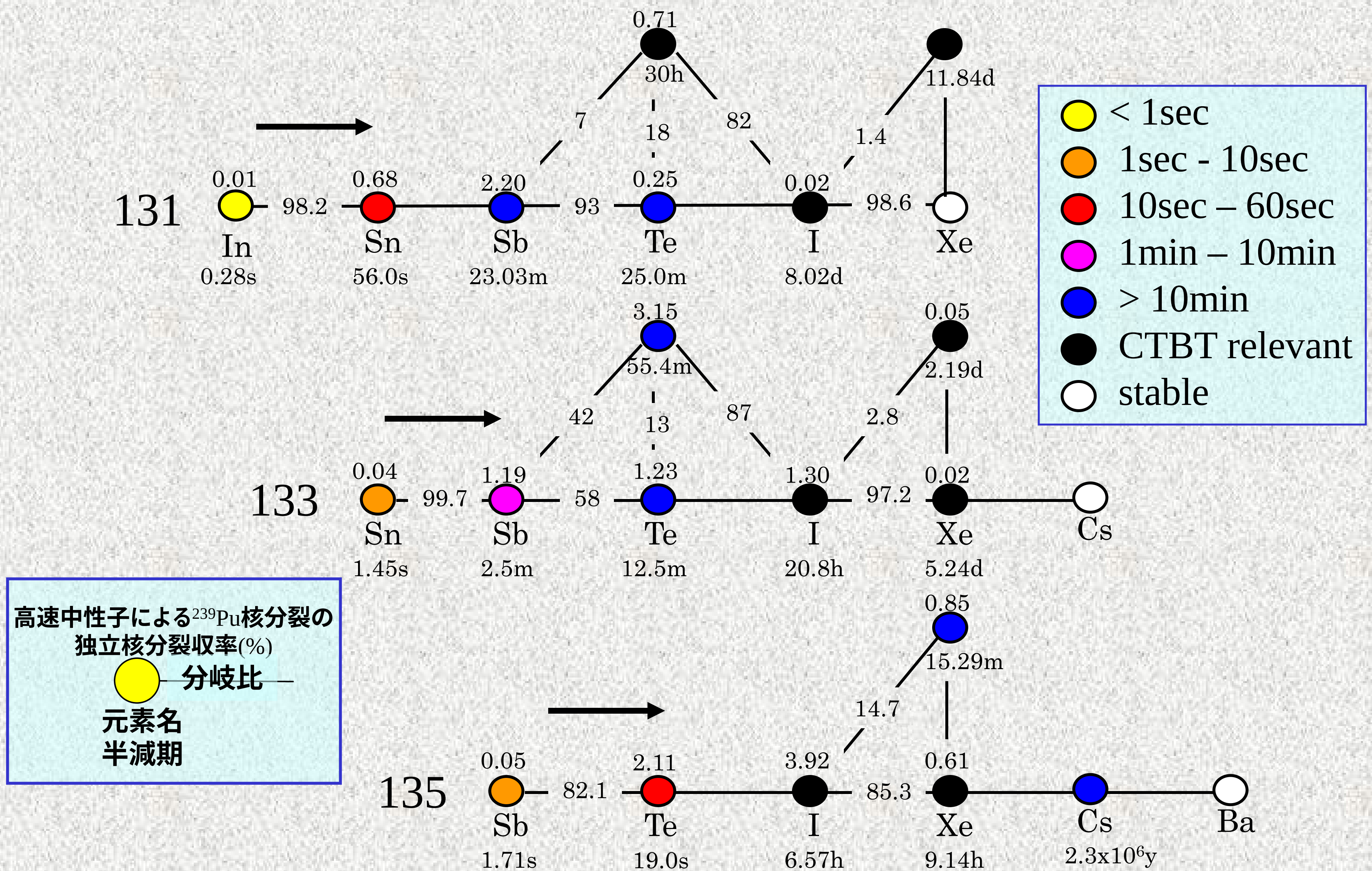
NDCソフトウェアの開発／
解析･評価手法の研究

高崎観測所で得られたγ線スペクトル例
－γ線解析ソフトウェアEBOB－

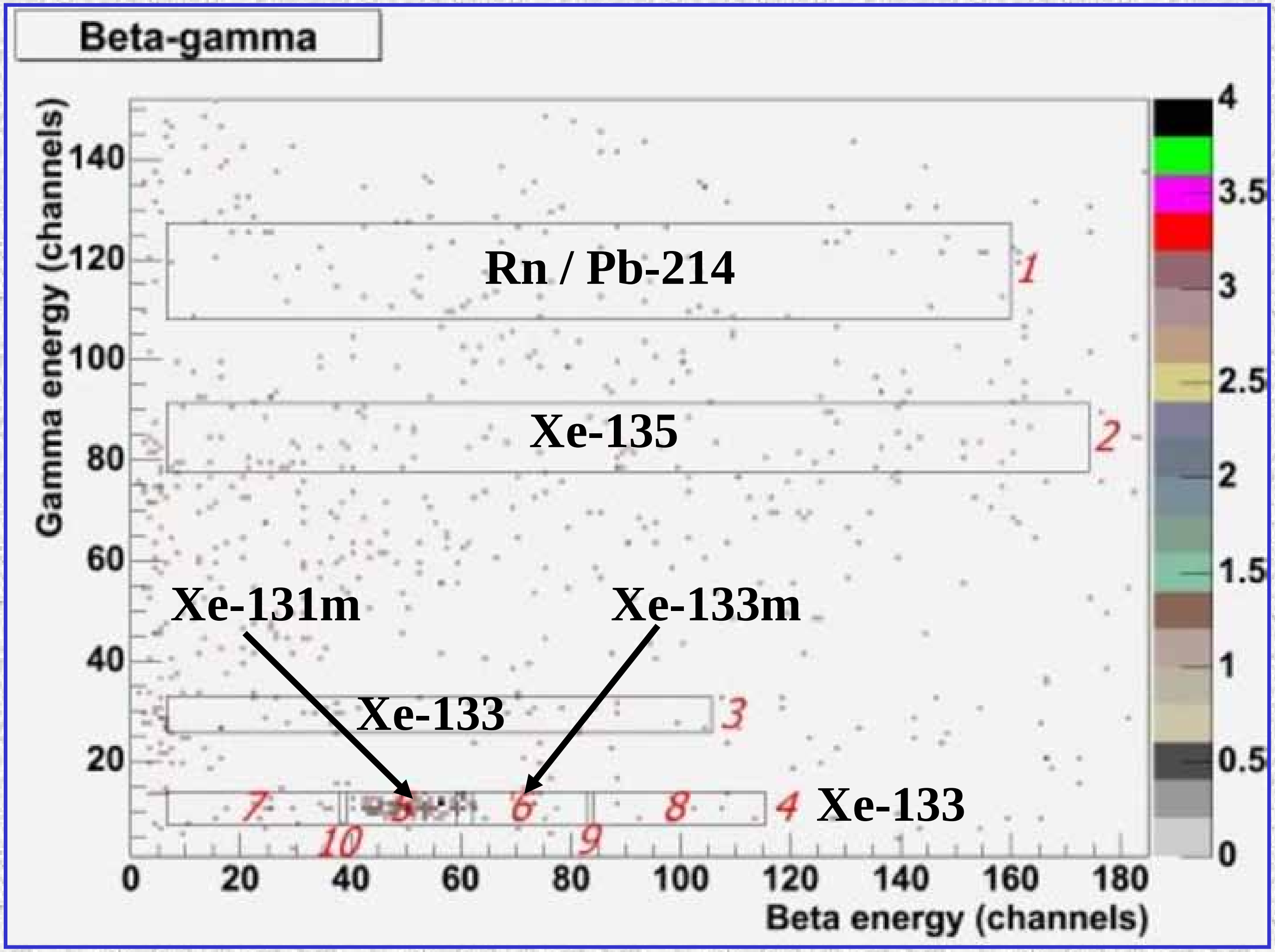


高崎観測所で通常検出される放射性核種：
Be-7, Ac-228, Bi-214, K-40, Pa-234m, Pb-210, Pb-212F, Pb-214, Ra-226, U-235

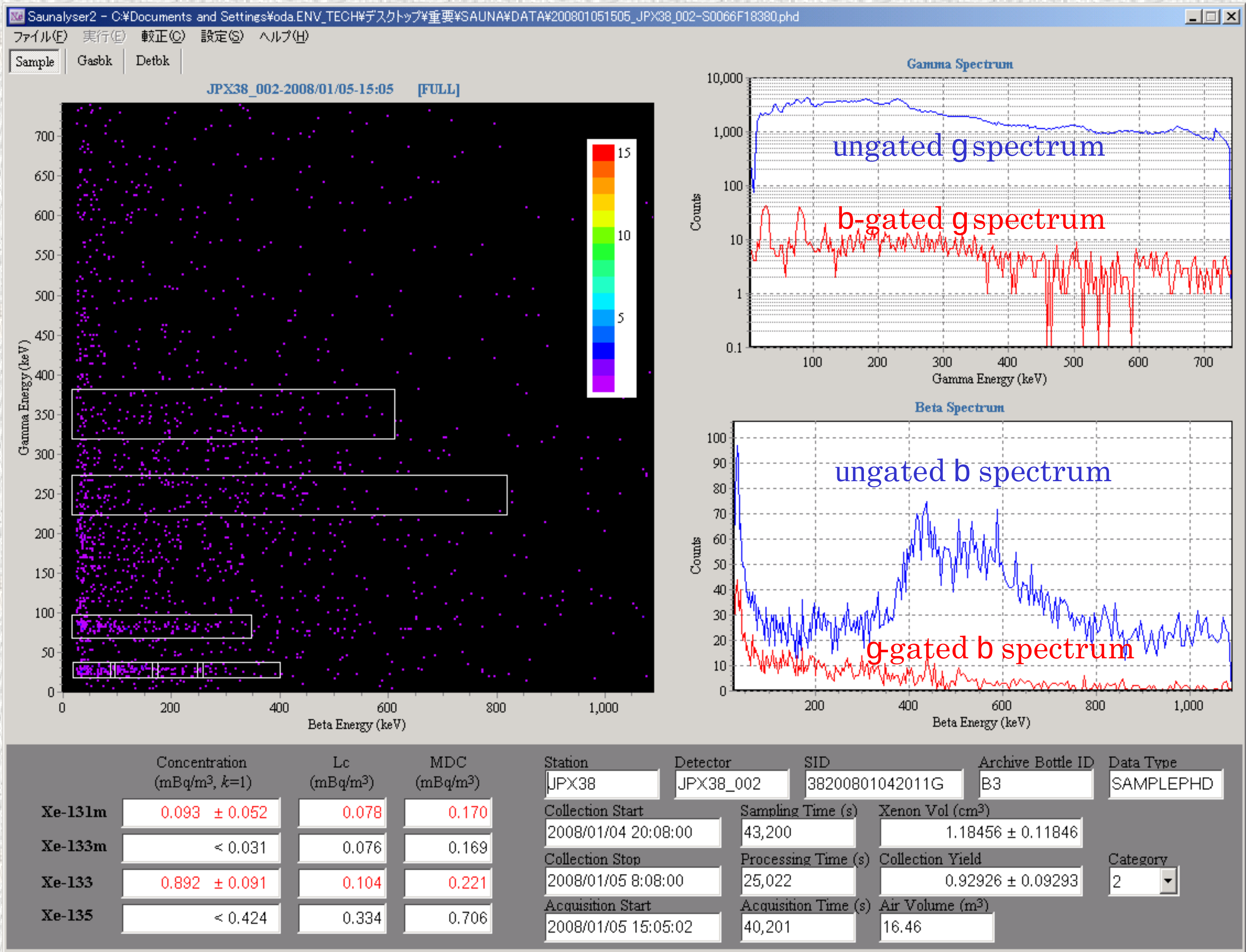
安定核より中性子過剰側の崩壊チェイン (M=131, 133. 135)



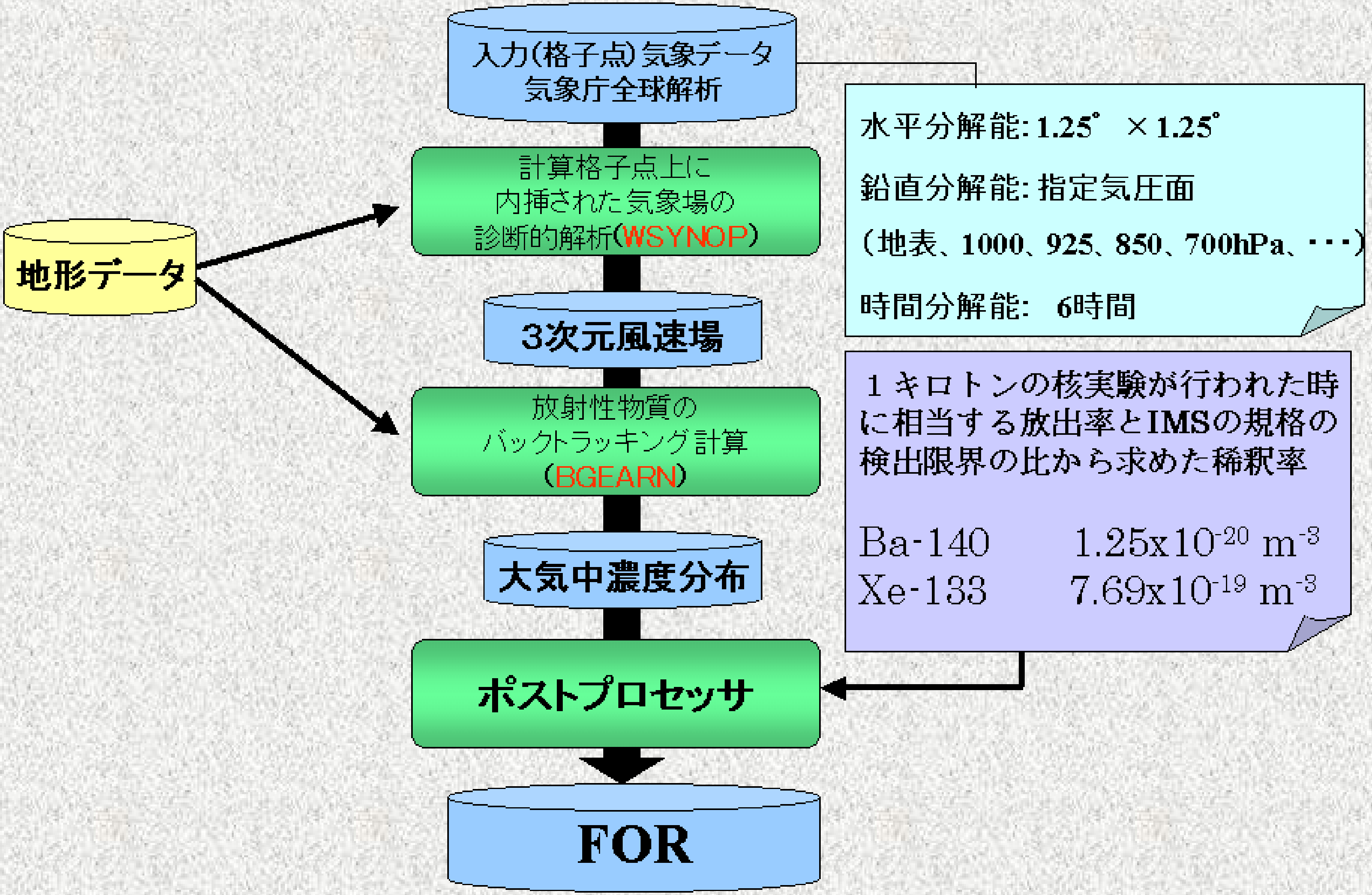
β-γ同時計数法による放射性Xeの解析
ー ROIの設定 ー



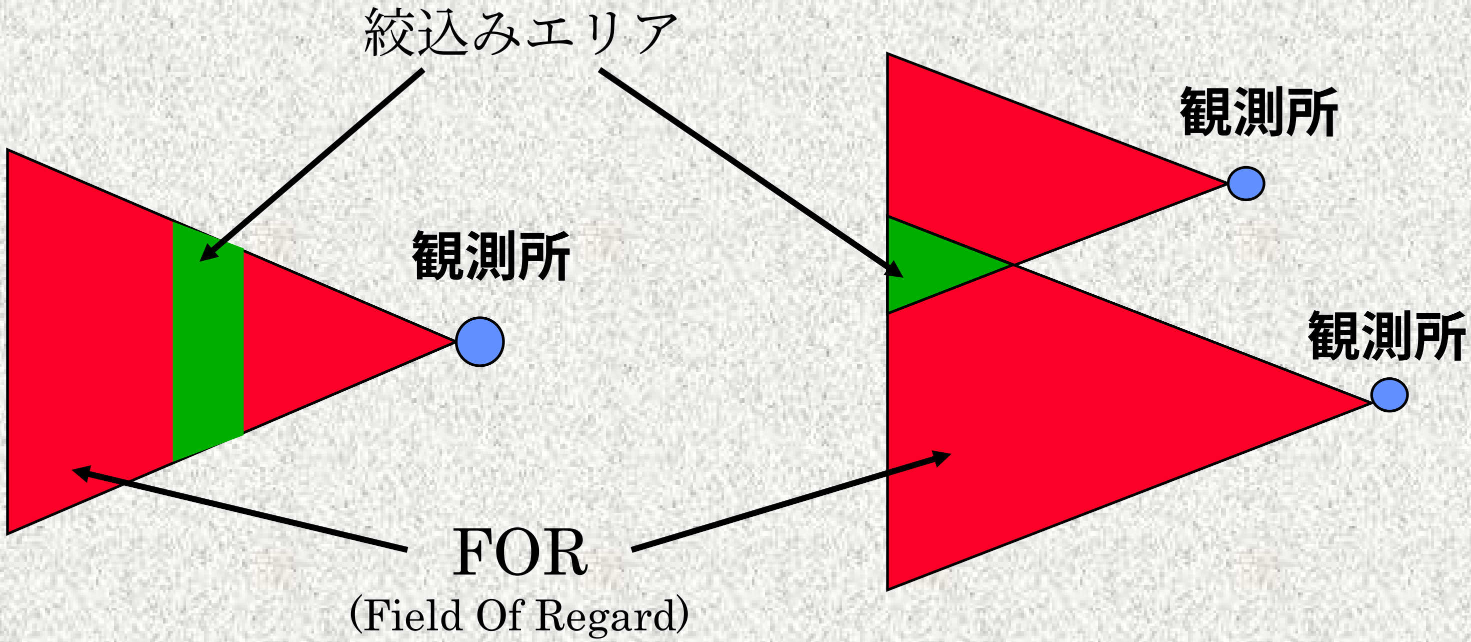
希ガス解析ソフトウェア (開発中)



放出源情報推定システムの概要



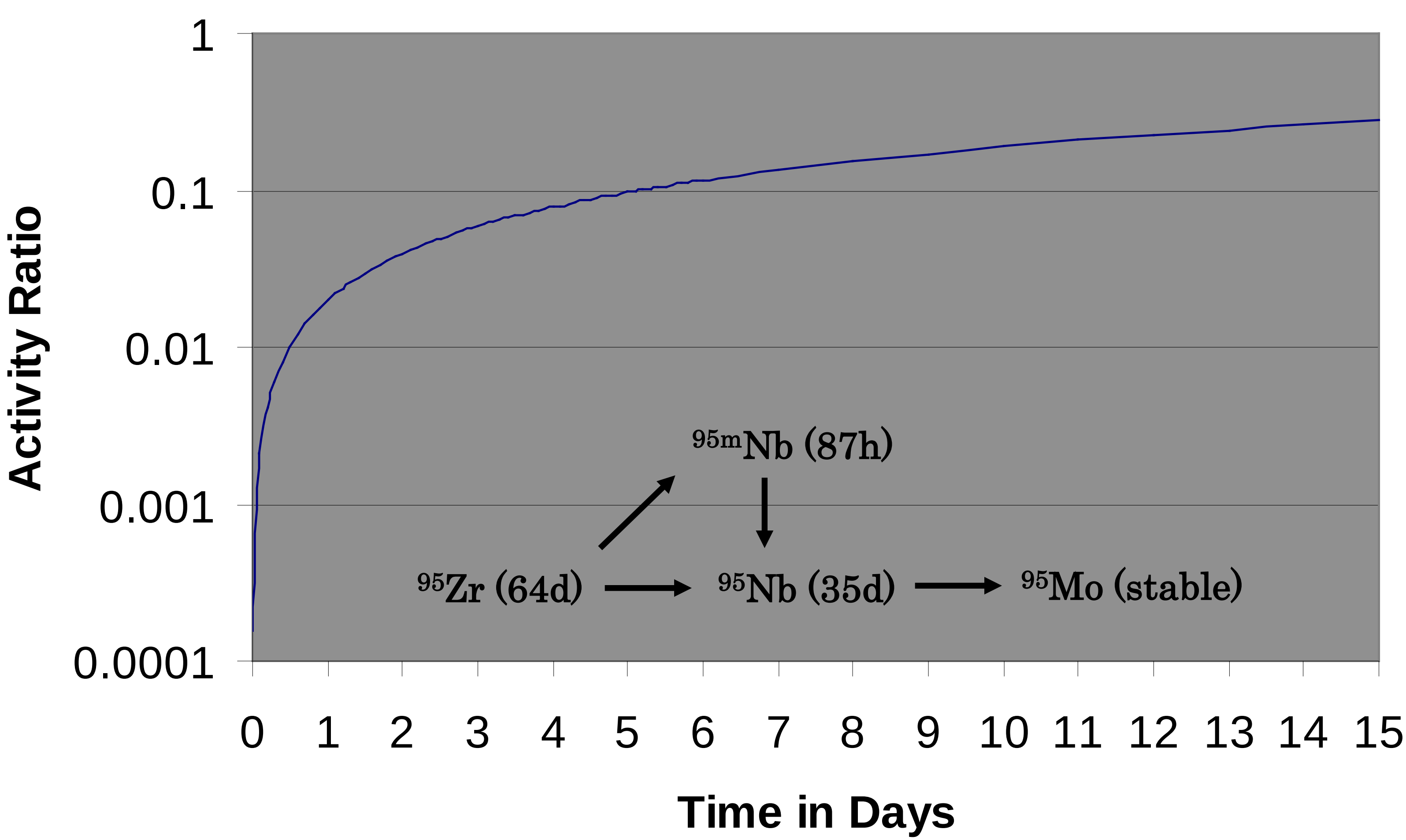
放出源推定解析



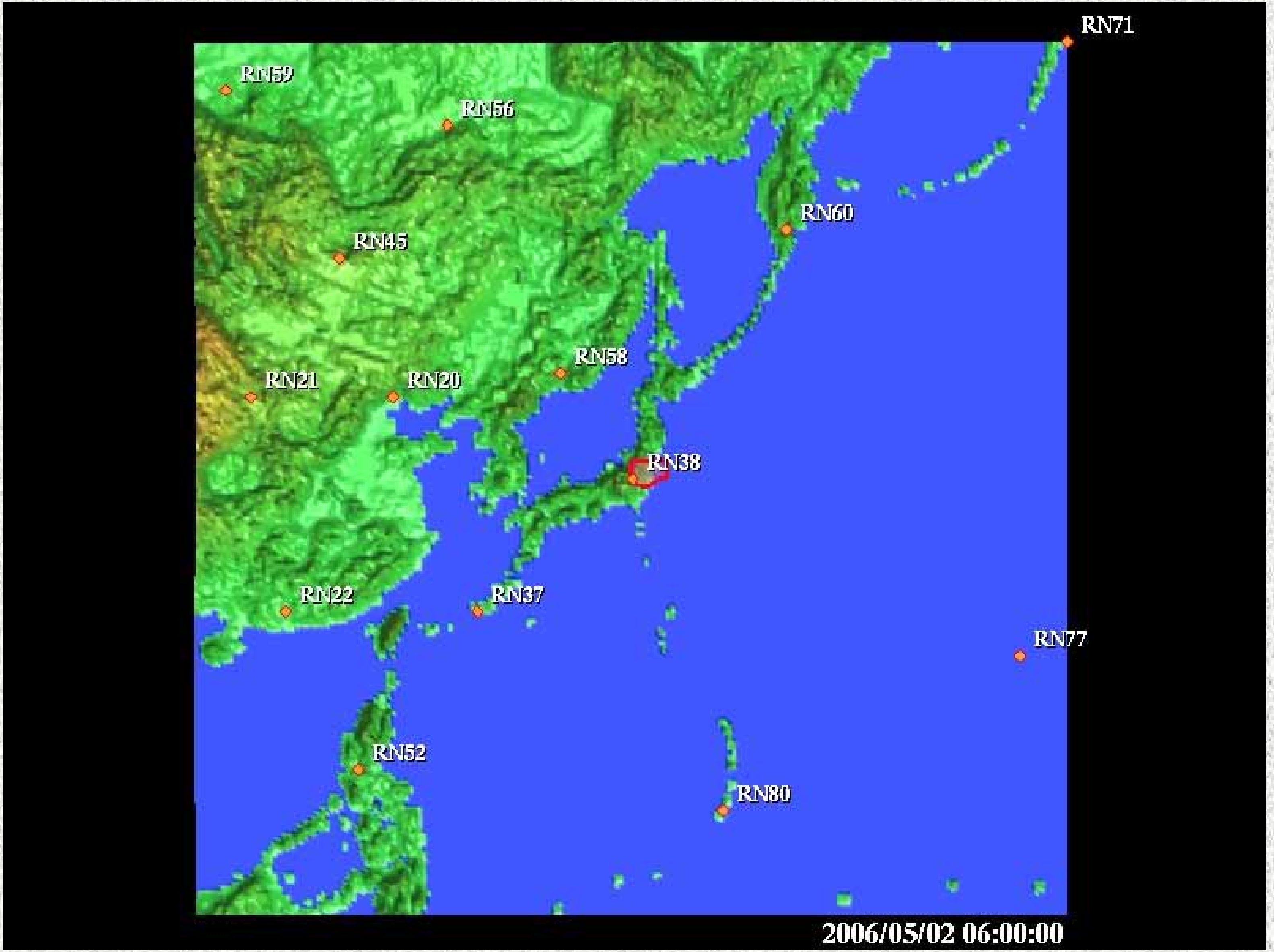
「ゼロタイム」による位置絞込み

複数観測所による位置絞込み

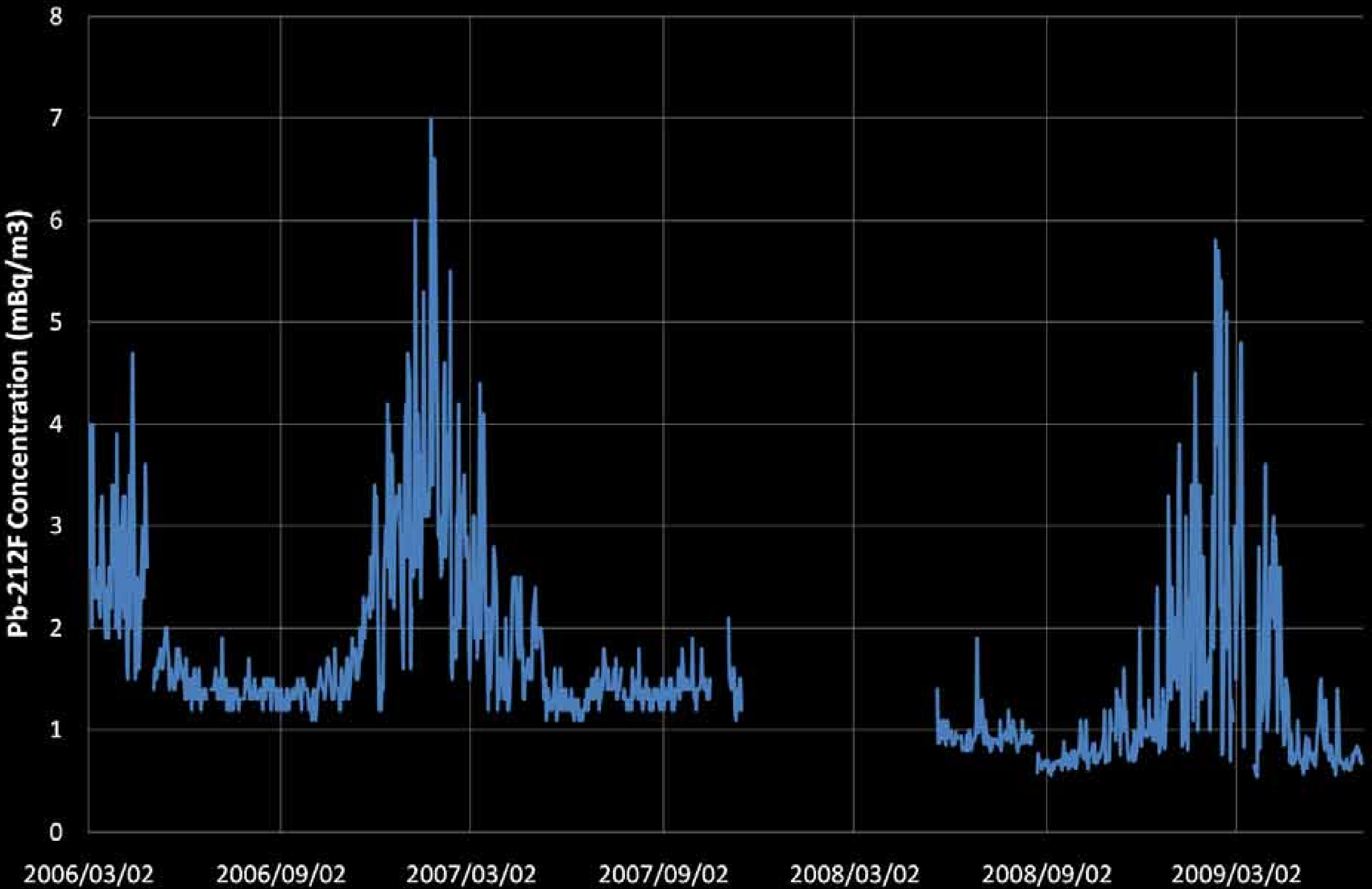
^{95}Nb / ^{95}Zr：核分裂後の放射能比の時間変化



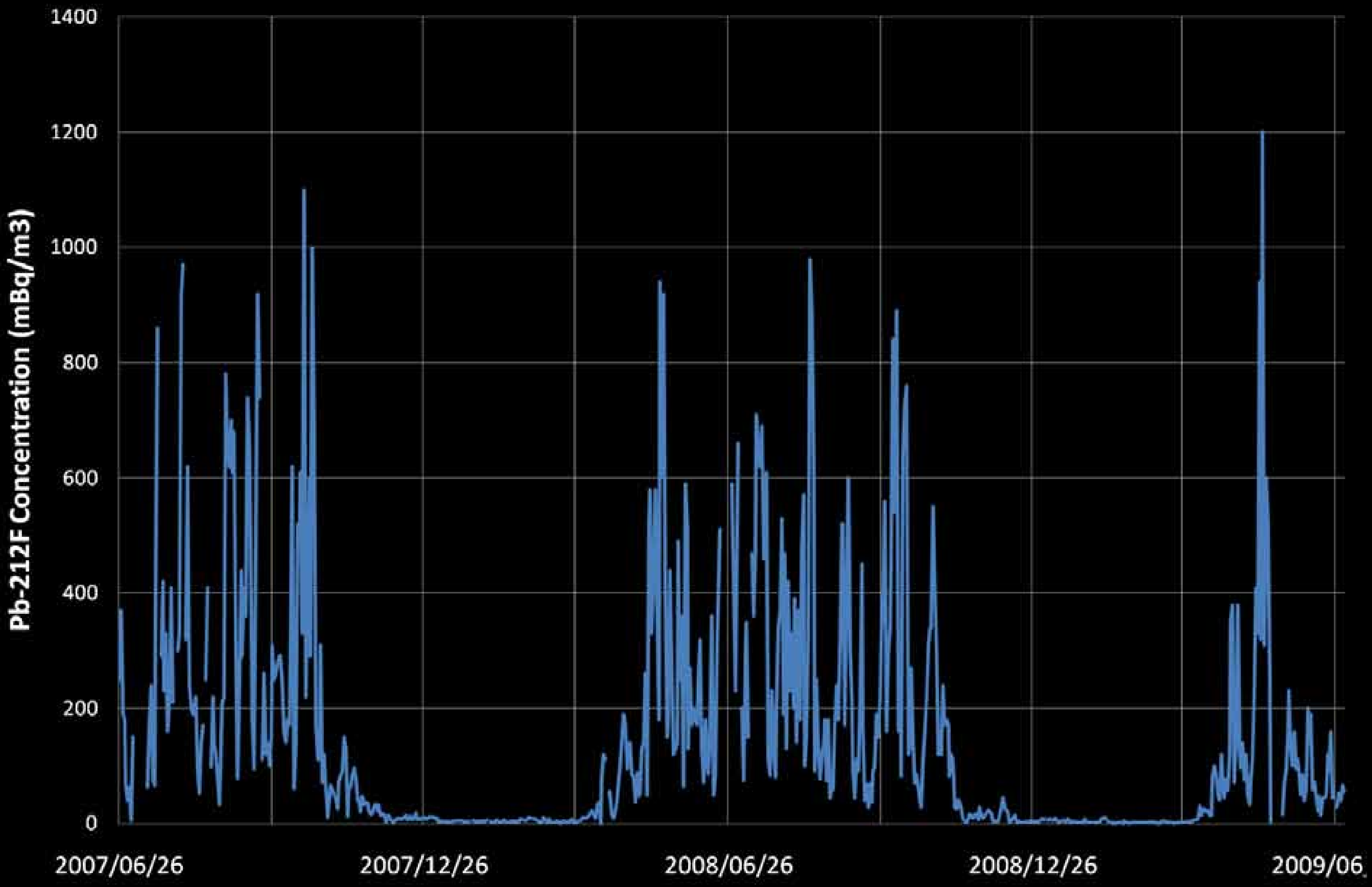
大気輸送モデル(ATM)による計算例



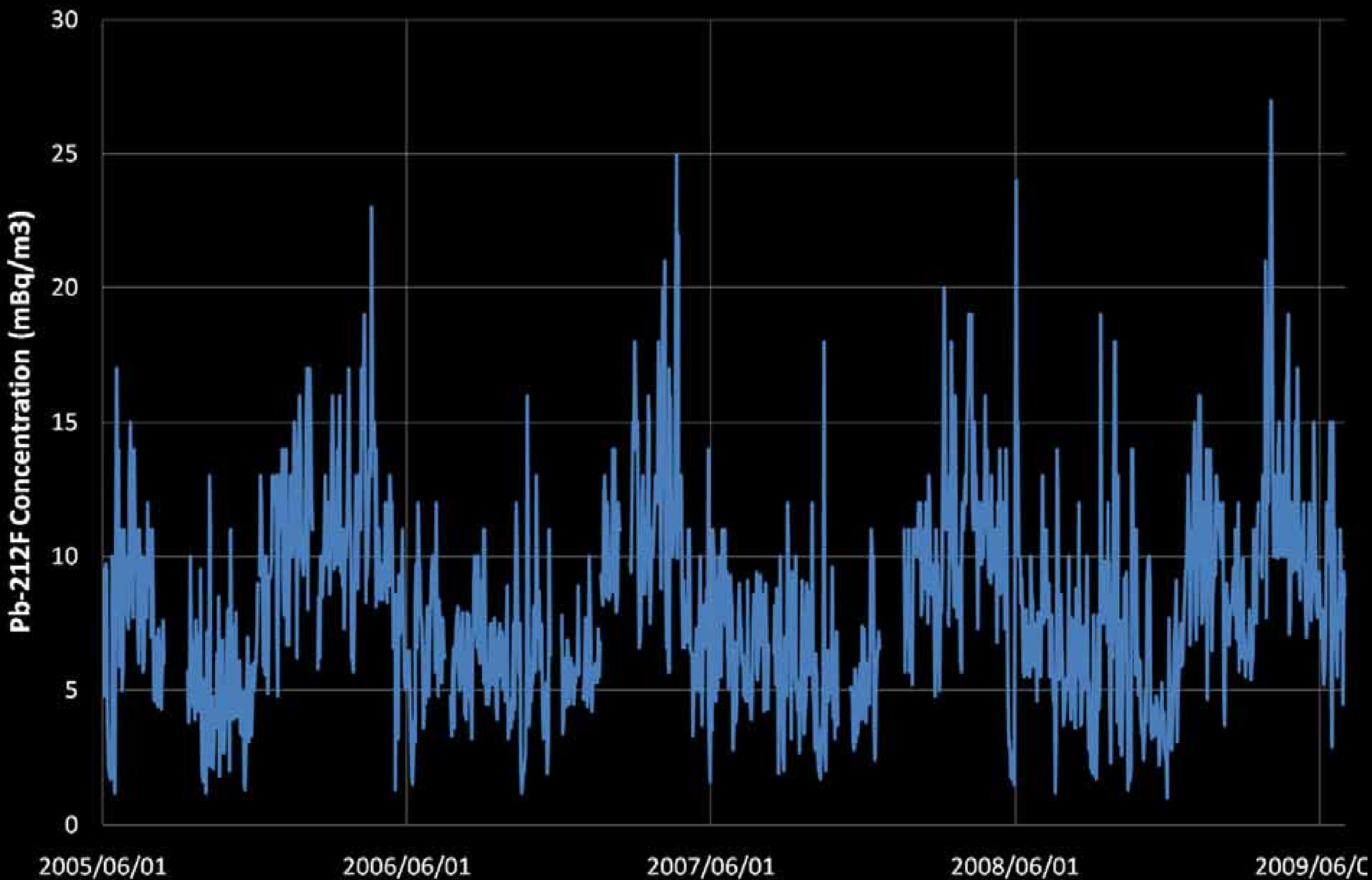
USP73(南極)におけるPb-212Fの年変化



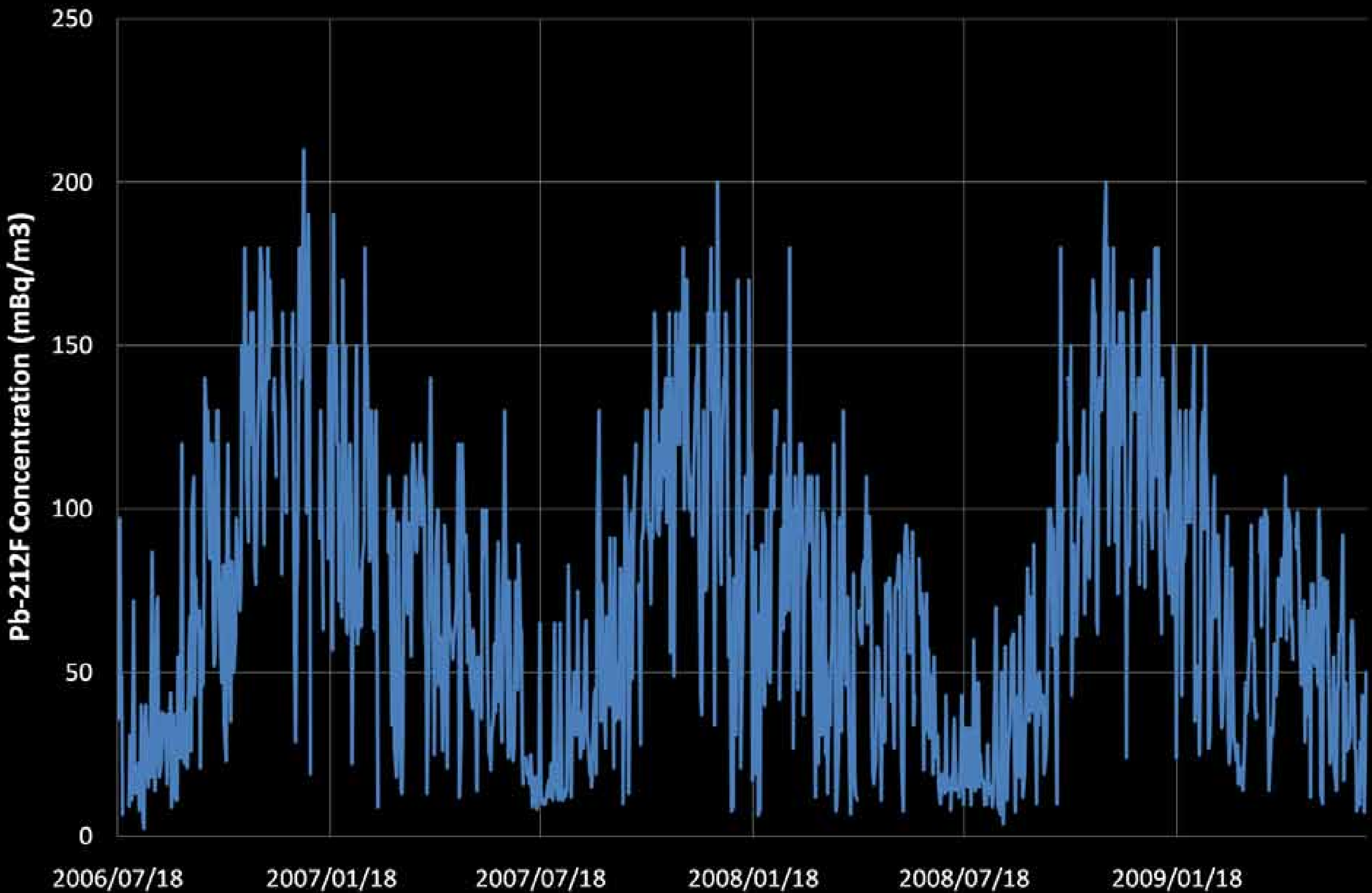
RUP59(Zalesovo)におけるPb-212Fの年変化



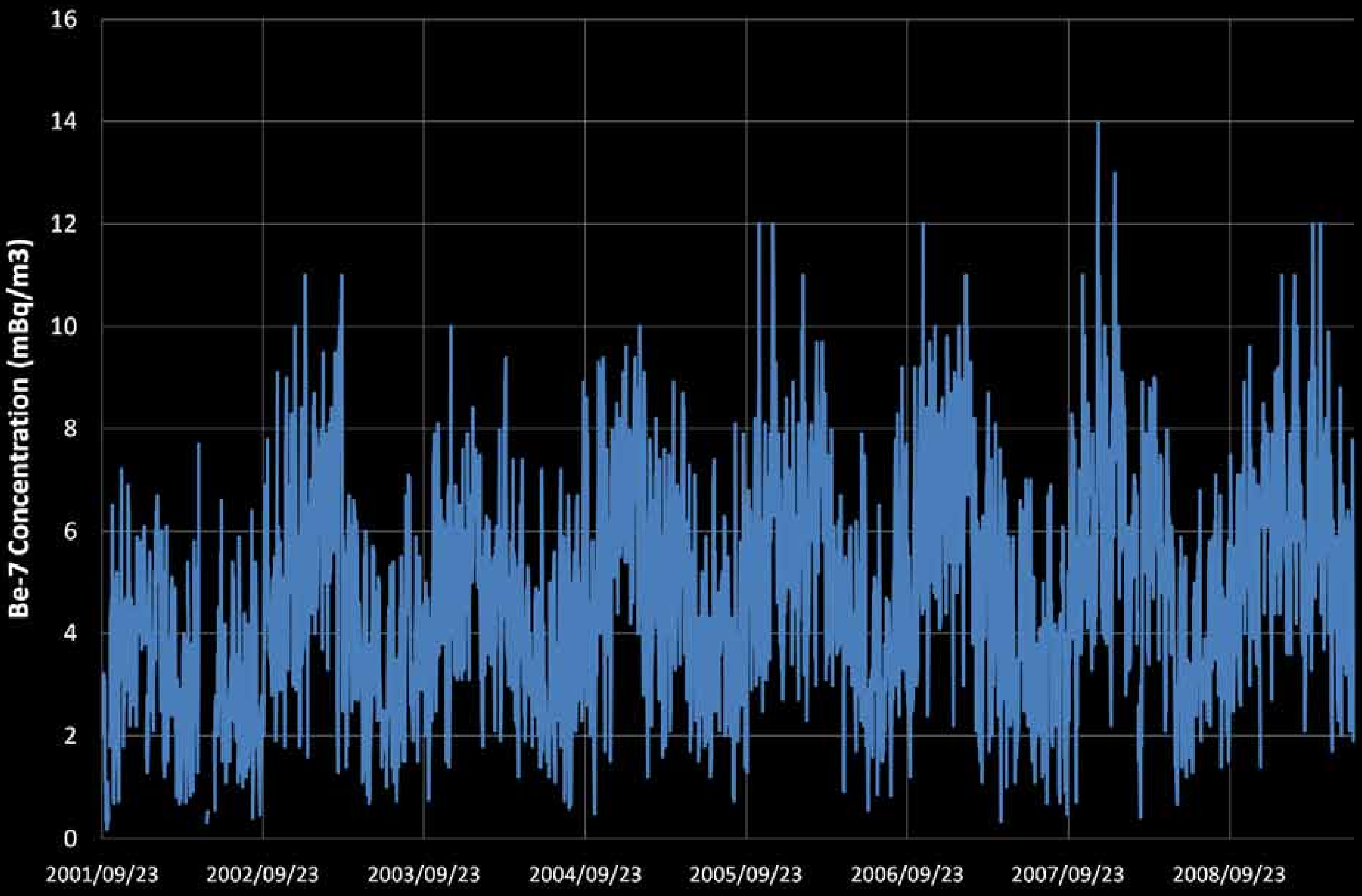
PAP50(Panama)におけるPb-212Fの年変化



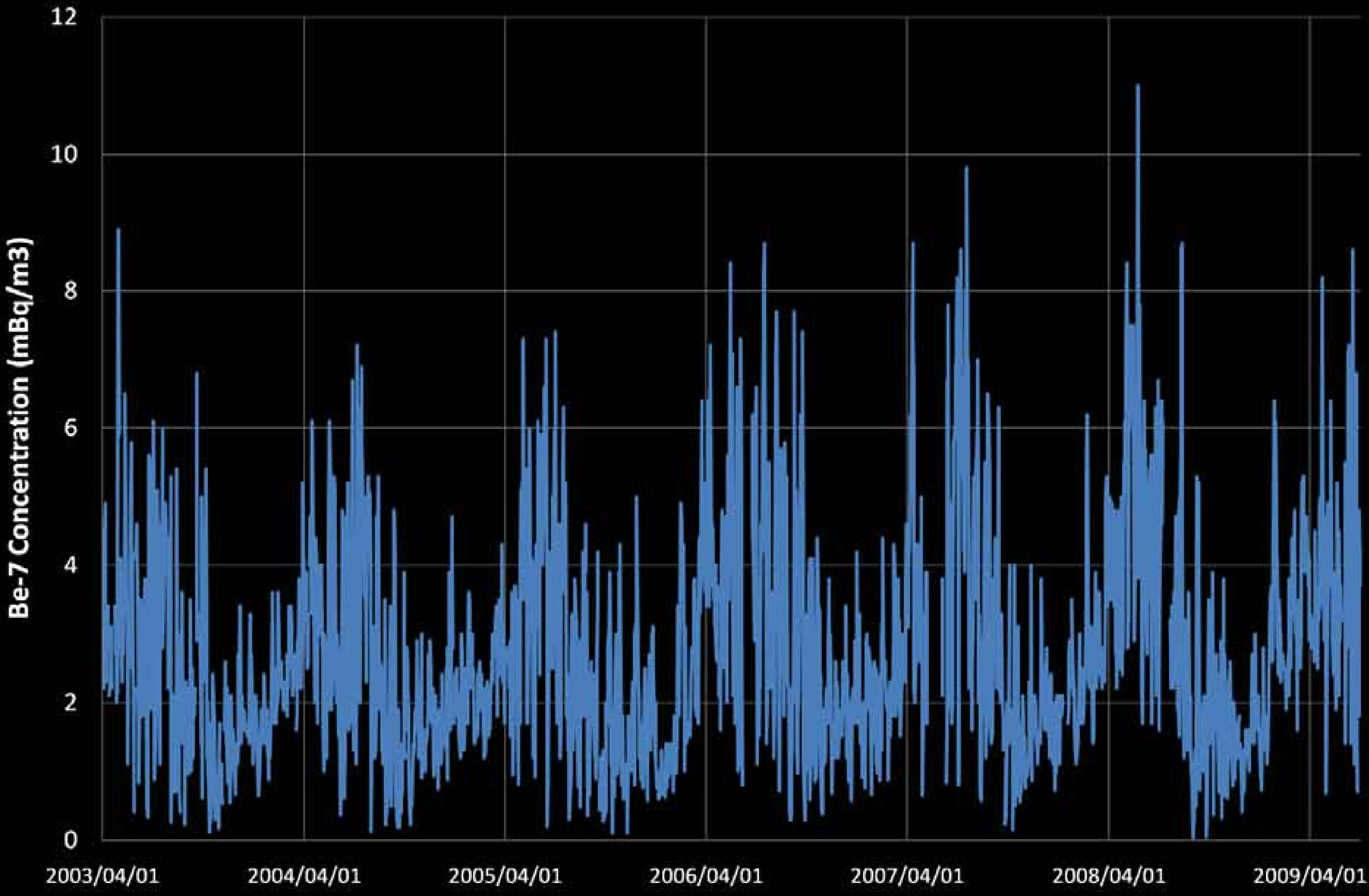
MRP43(Mauritania)におけるPb-212Fの年変化



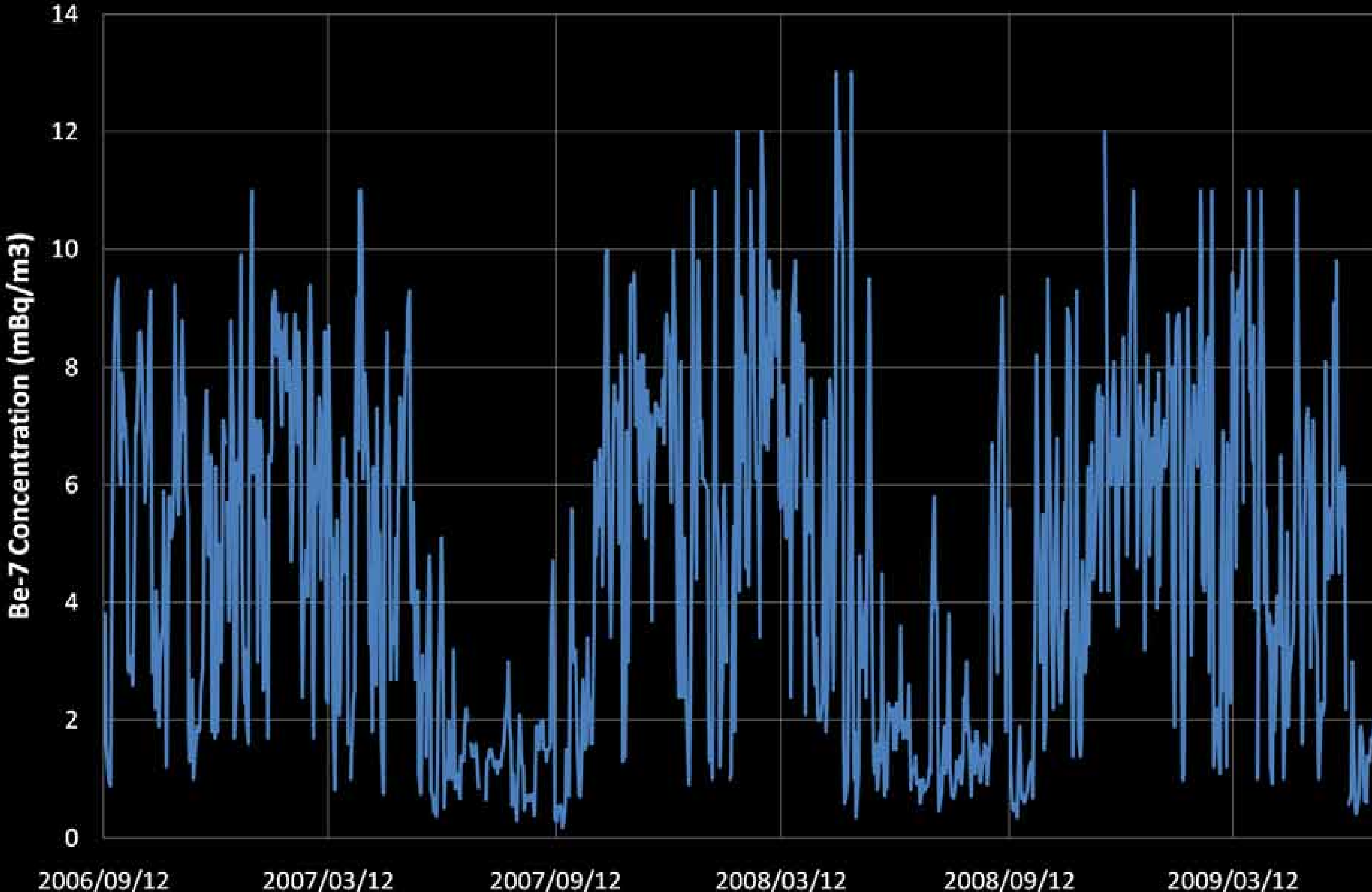
ARP01(Buenos Aires)におけるBe-7の年変化



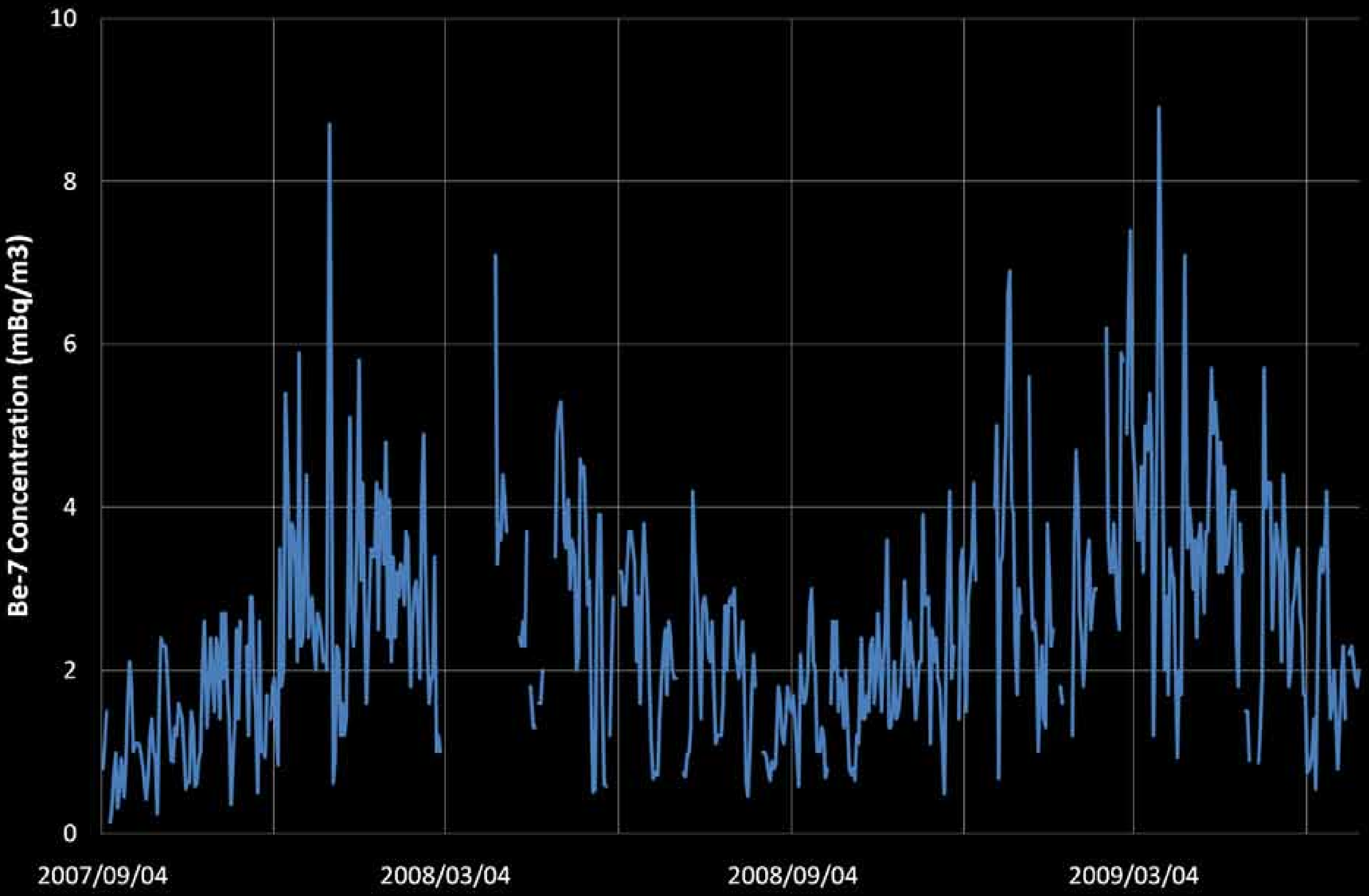
CAP16(Yellowknife)におけるBe-7の年変化



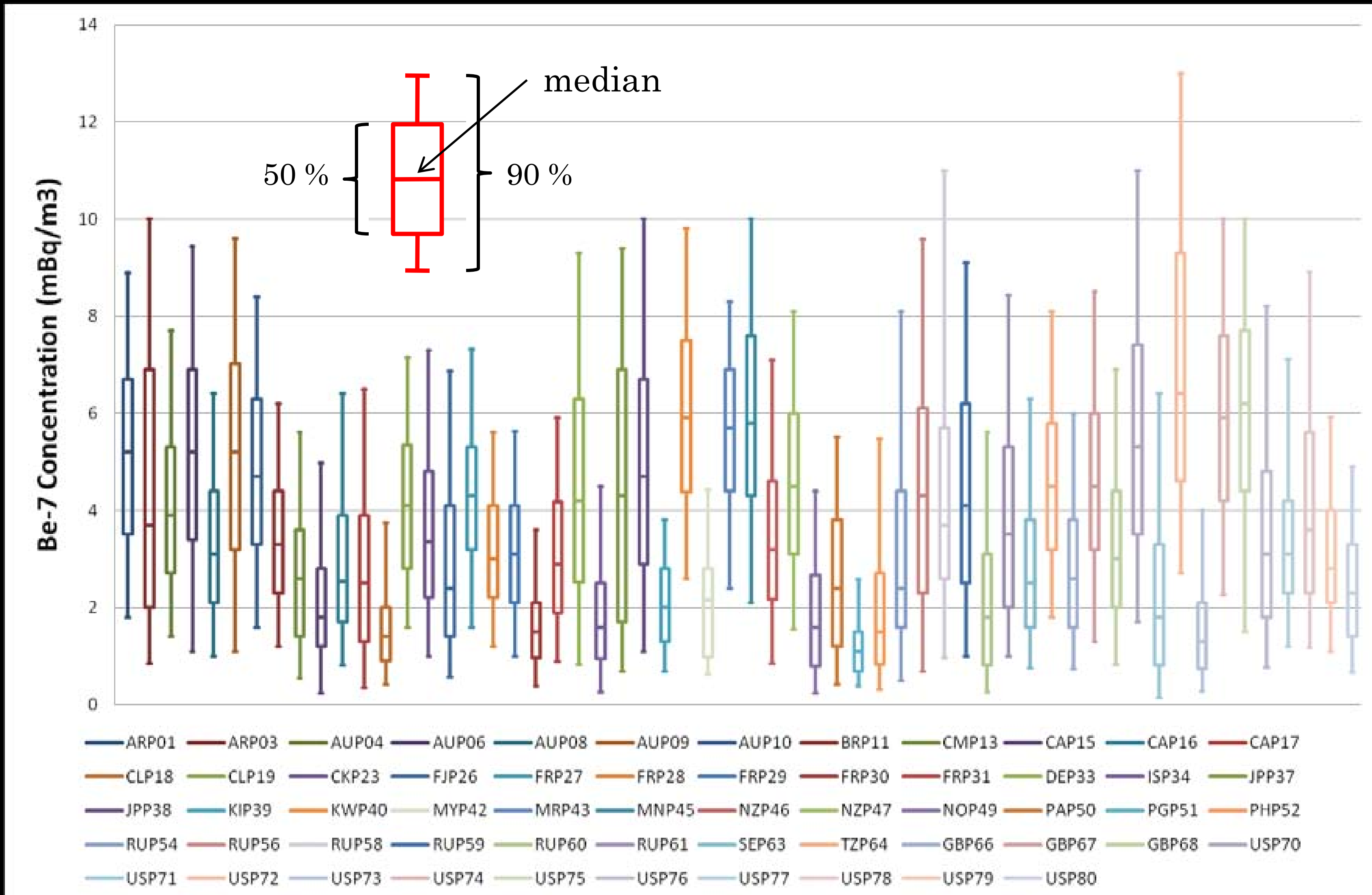
JPP37(沖縄)におけるBe-7の年変化



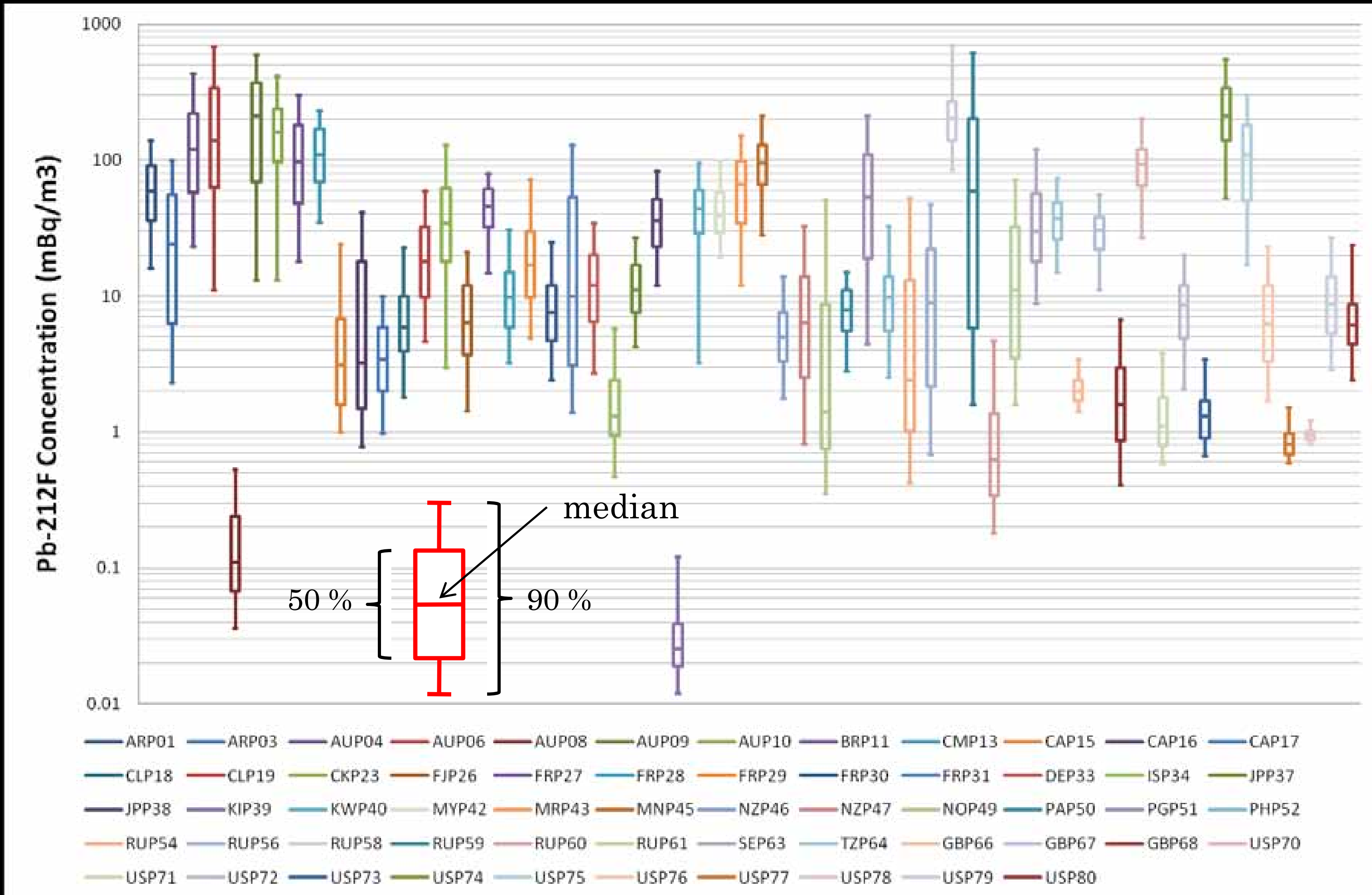
USP80(Guam)におけるBe-7の年変化



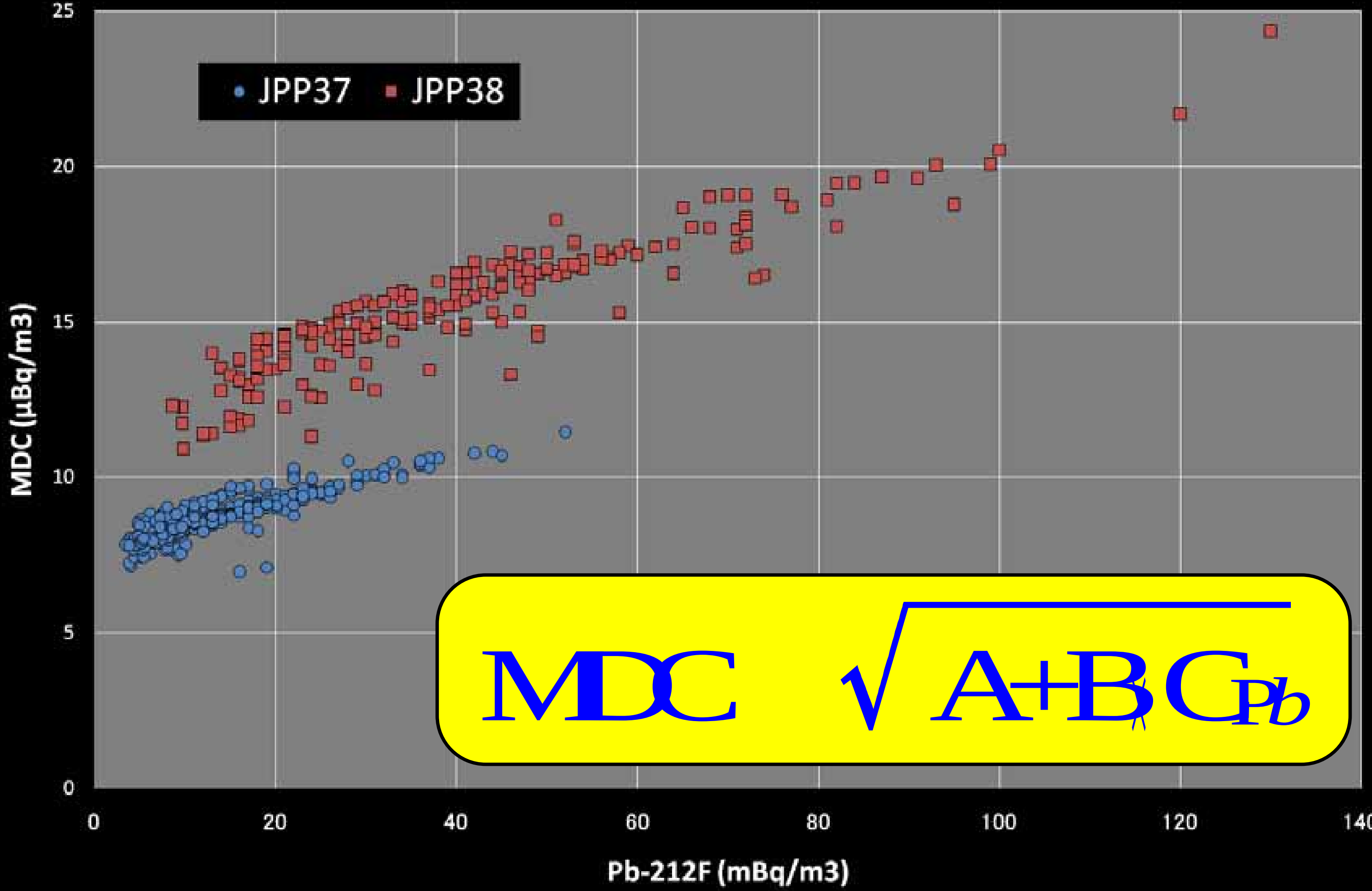
各観測所におけるBe-7の濃度分布
－ Box-Whisker Plot－



各観測所におけるPb-212Fの濃度分布
－ Box-Whisker Plot－

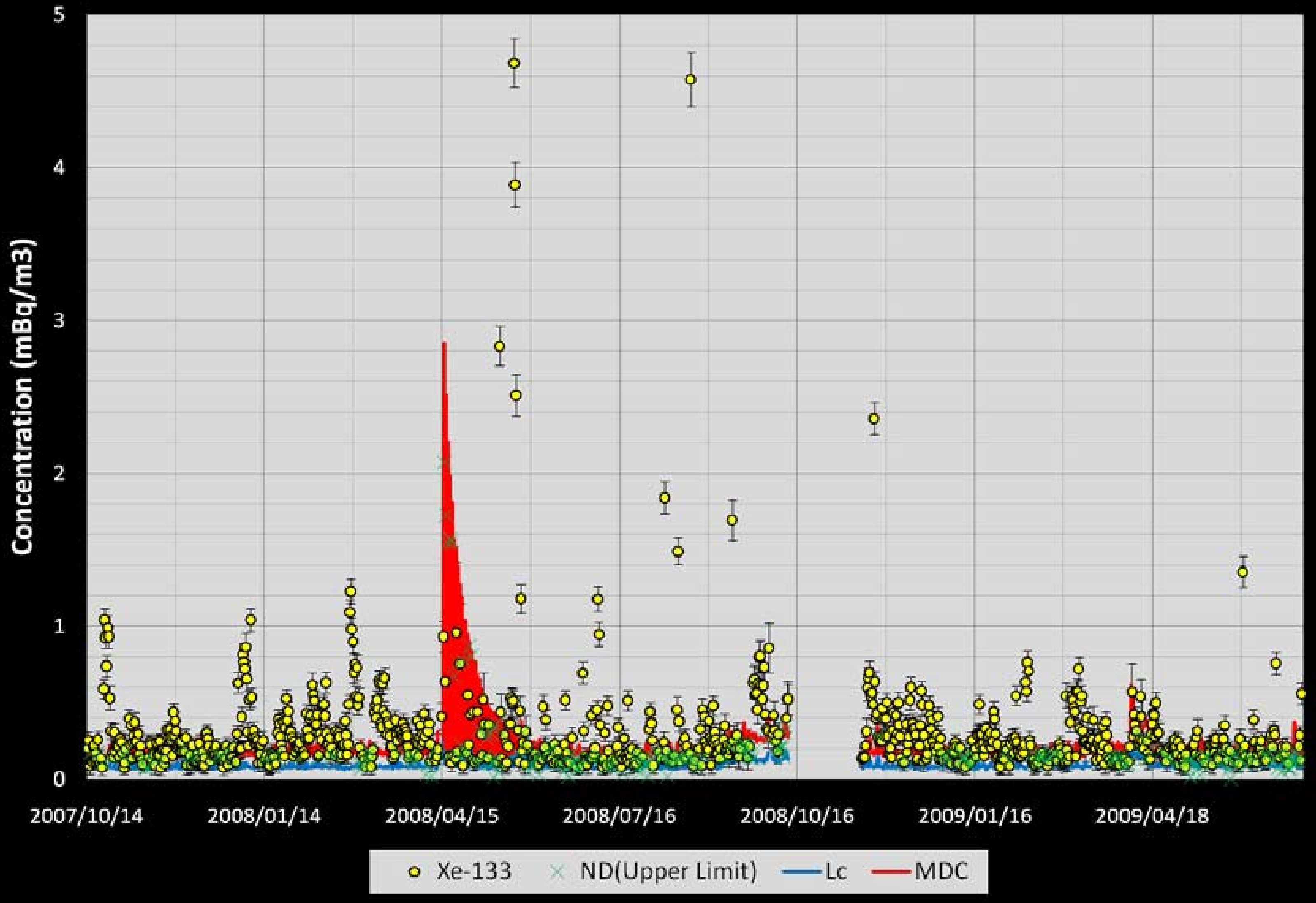


MDCとPb-212Fとの関係

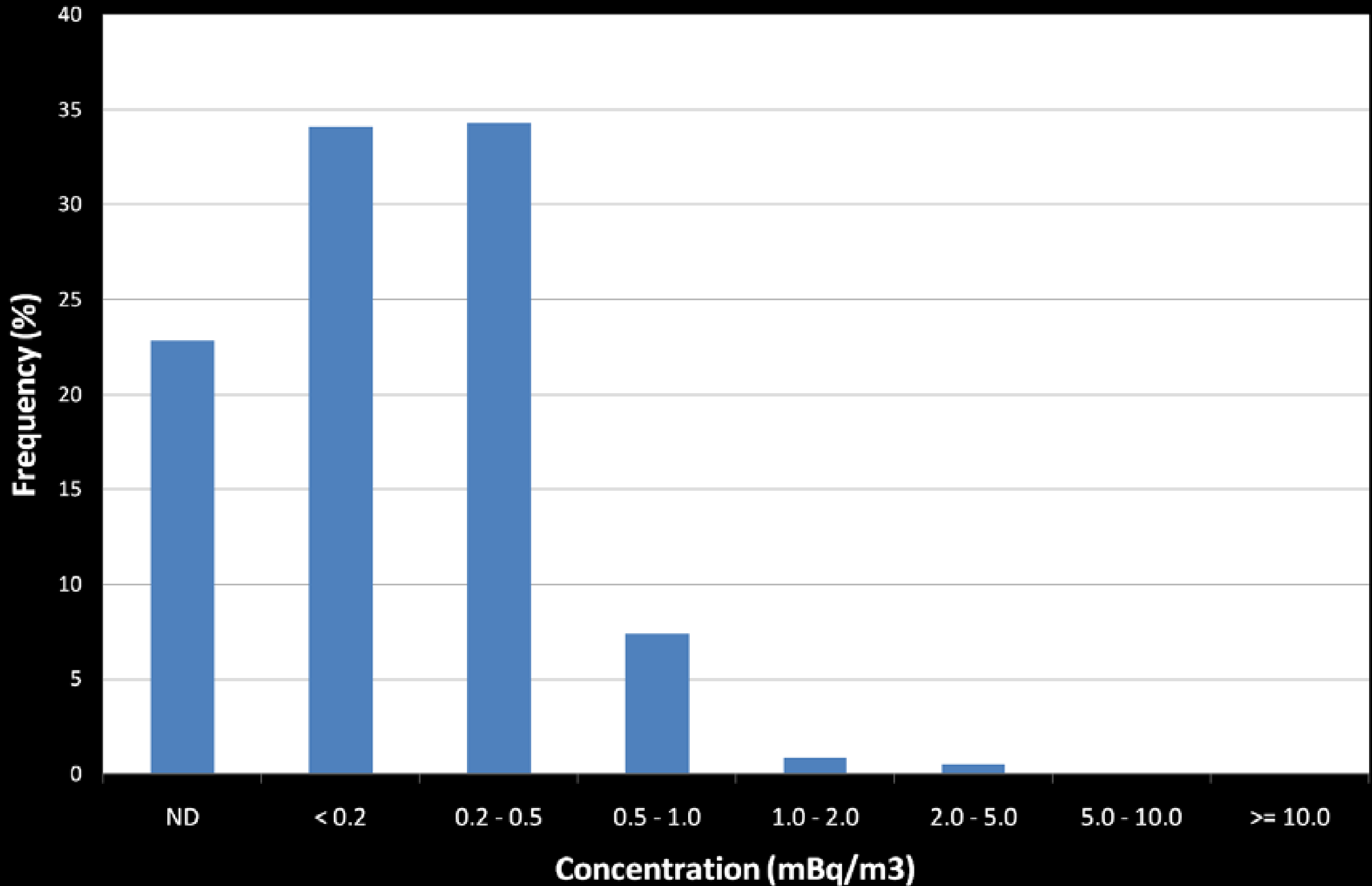


$$MDC \quad \sqrt{A+B\,C_{Pb}}$$

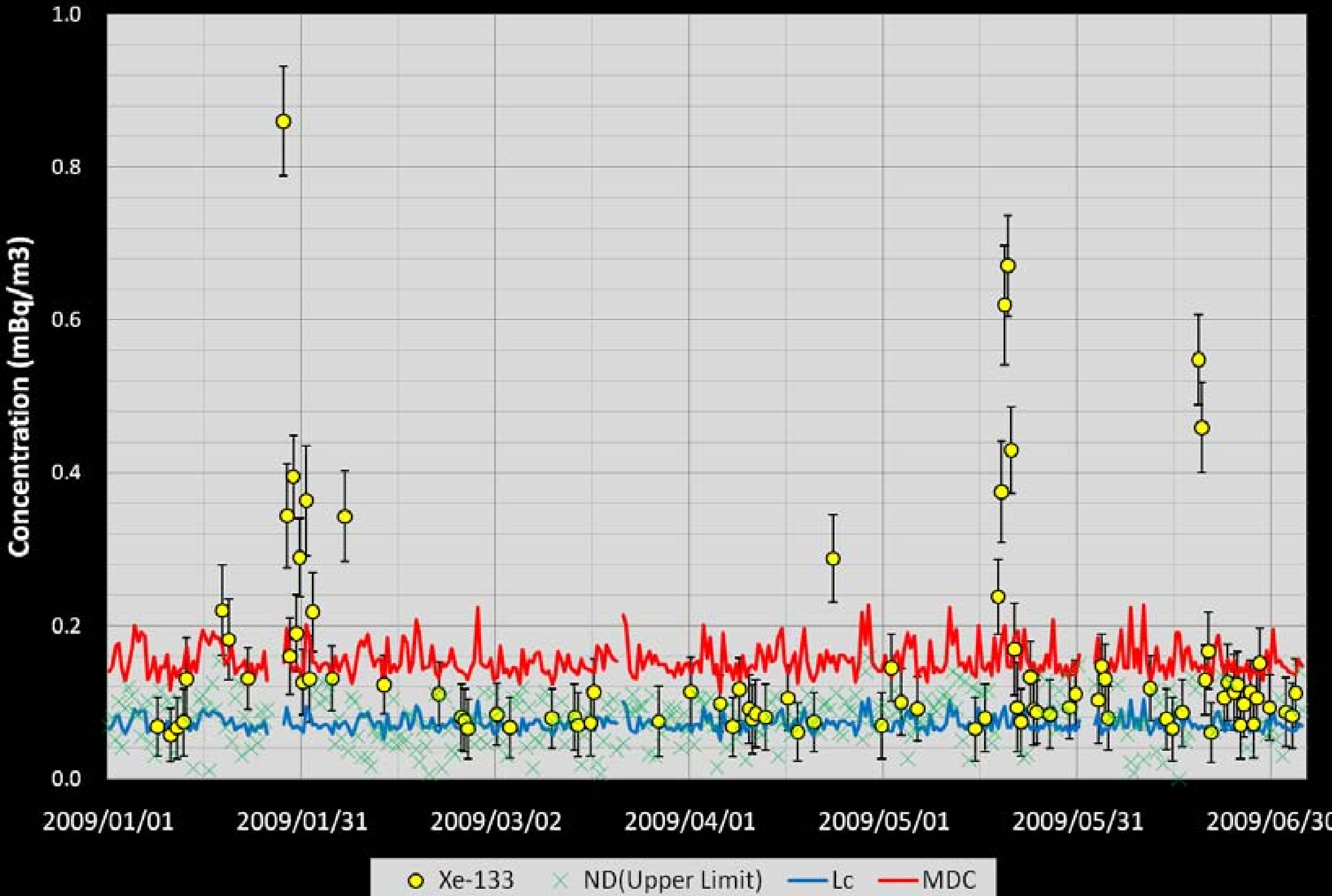
JPX38(高崎)における^{133}Xeの濃度変動
2007年10月14日～2009年 7月 5日



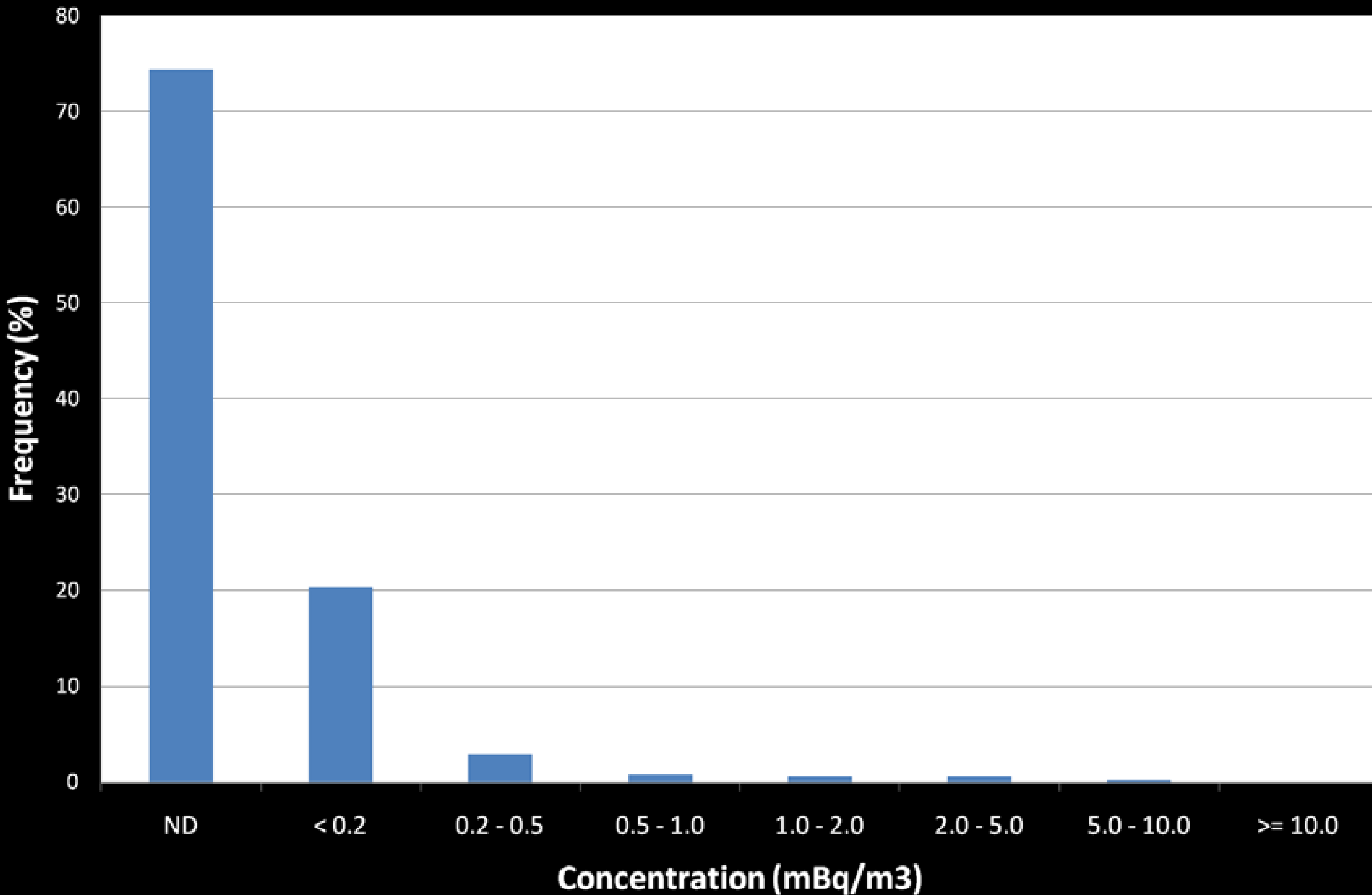
JPX38(高崎)における^{133}Xeの濃度分布
2007年10月14日～2009年 7月 5日



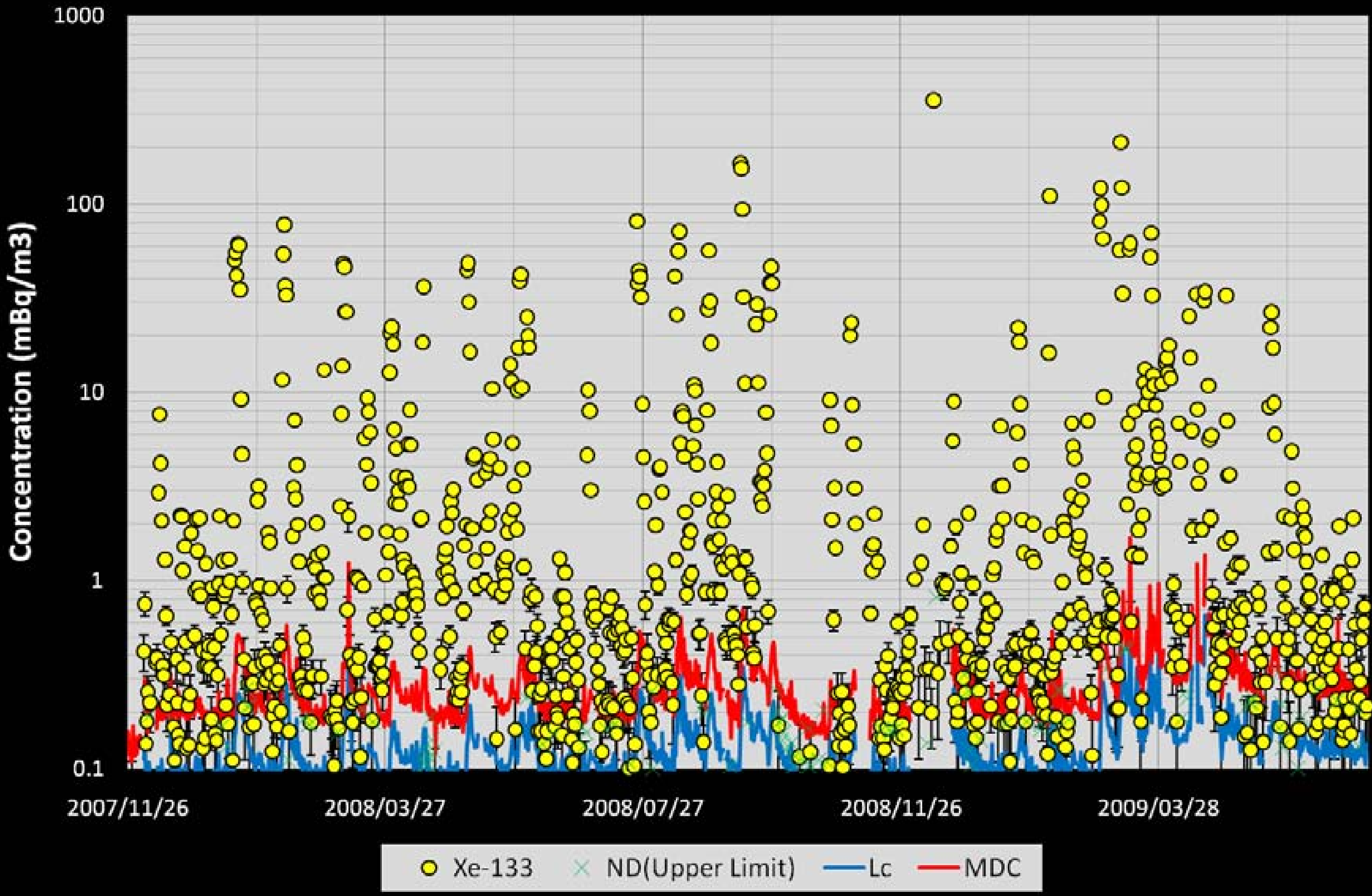
AUX04(Melbourne)における^{133}Xeの濃度変動
2009年 1月 1日～2009年 7月 5日



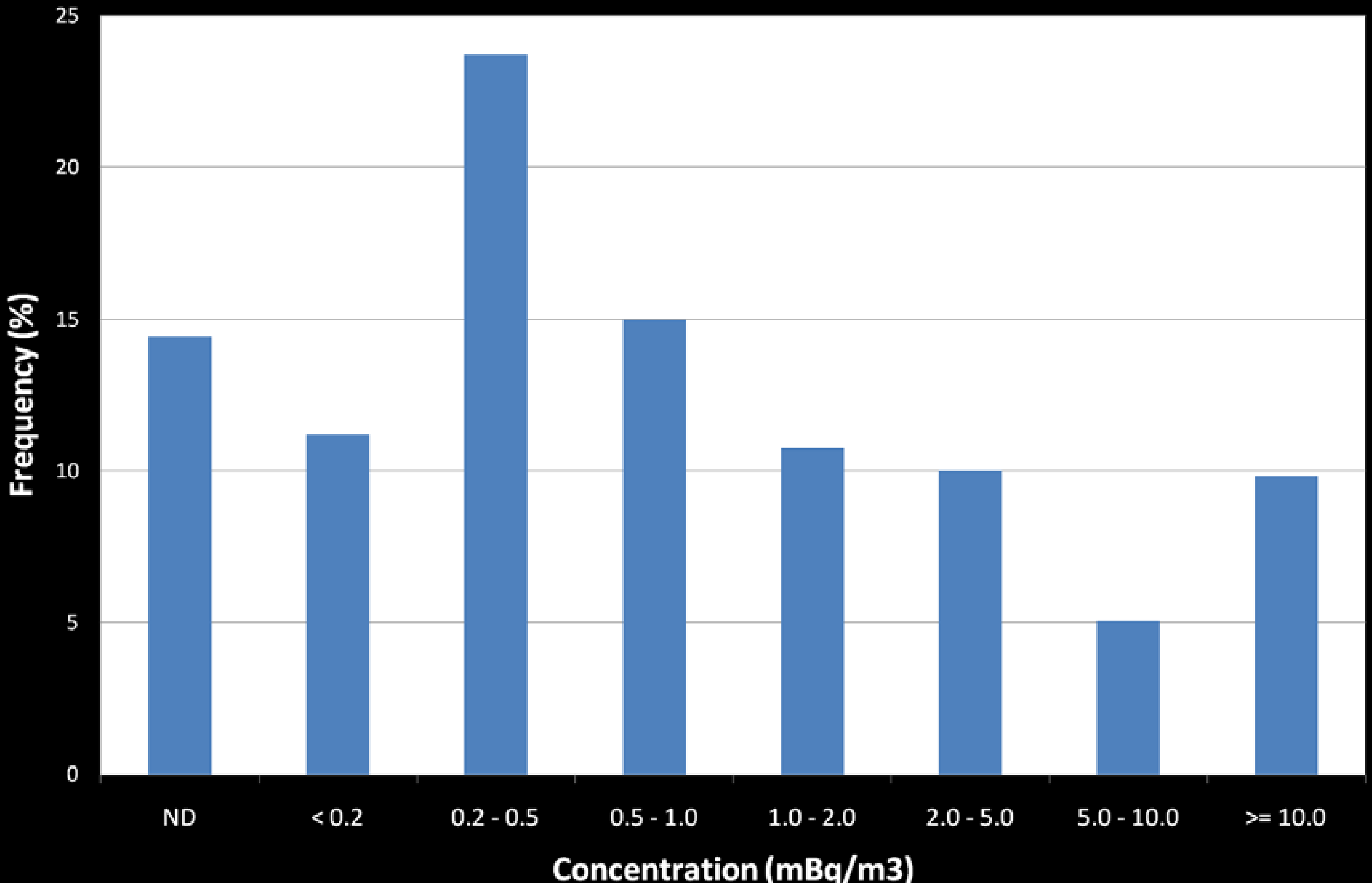
AUX04(Melbourne)における^{133}Xeの濃度分布
2008年11月14日～2009年 7月 5日



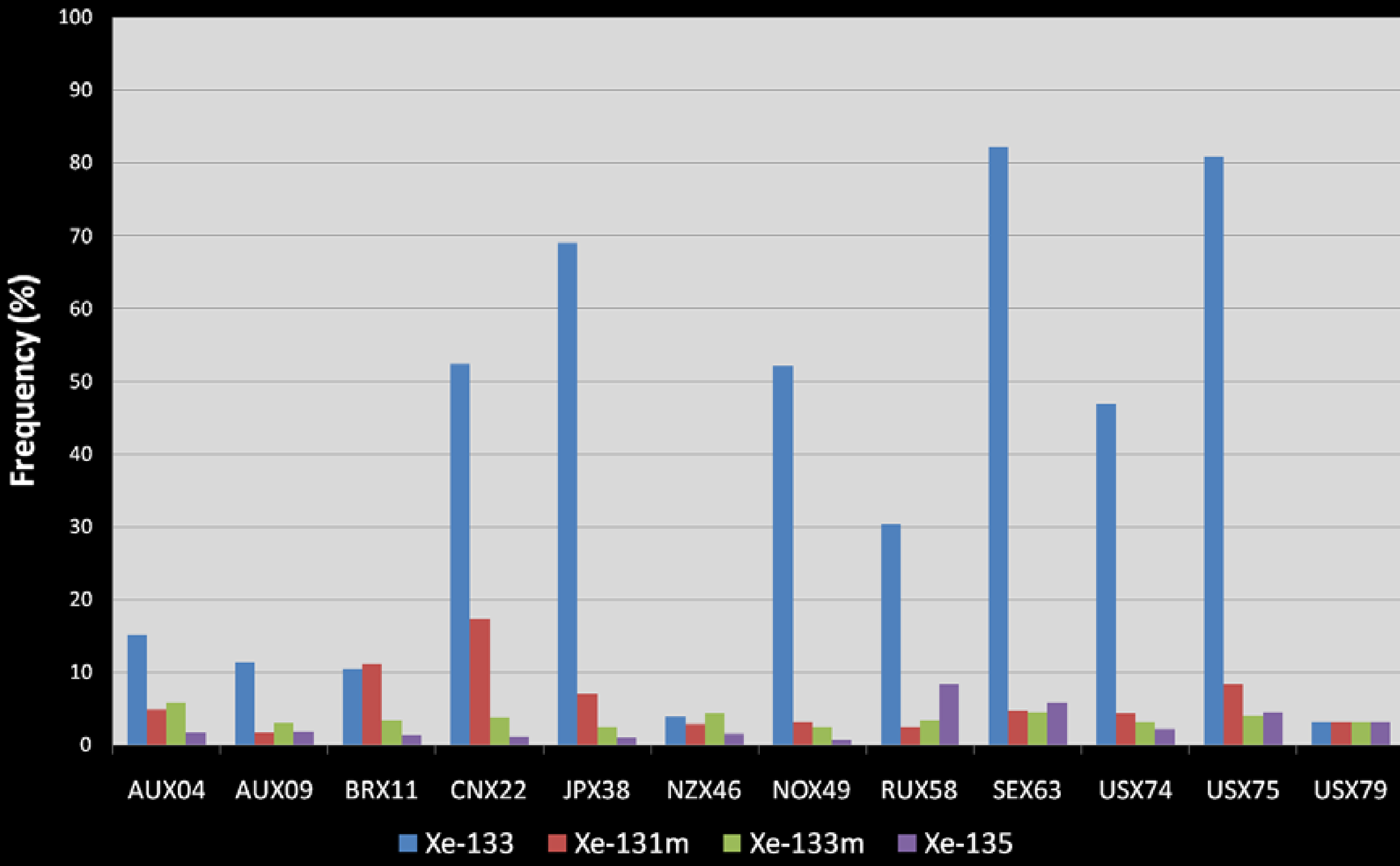
USX75(Charlottesville)における^{133}Xeの濃度変動
2007年11月26日～2009年 7月 5日



USX75(Charlottesville)における^{133}Xeの濃度分布
2007年11月26日～2009年 7月 5日

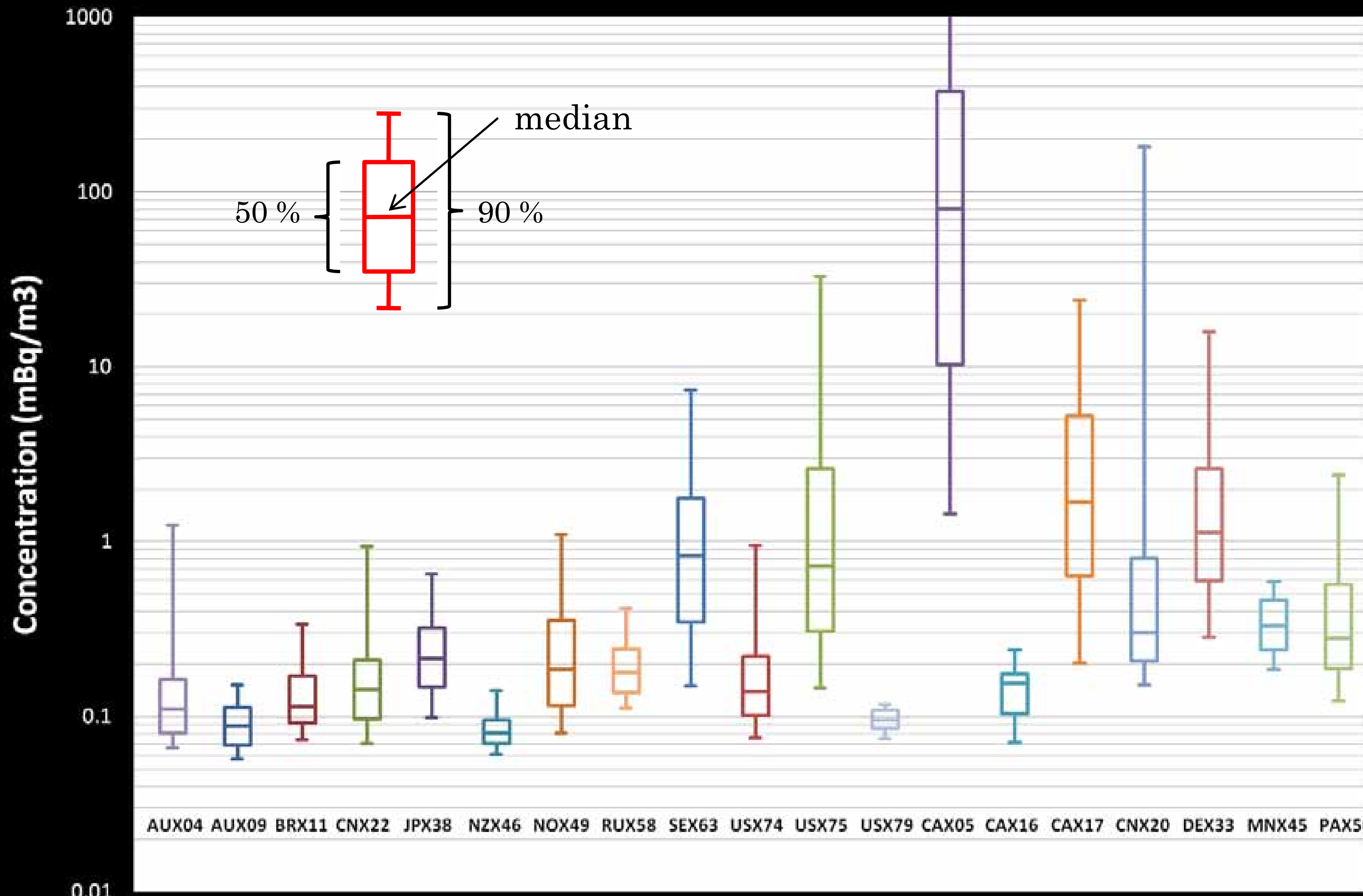


各観測所における放射性Xeの検知頻度
― 有意水準* 1%による検定 ―

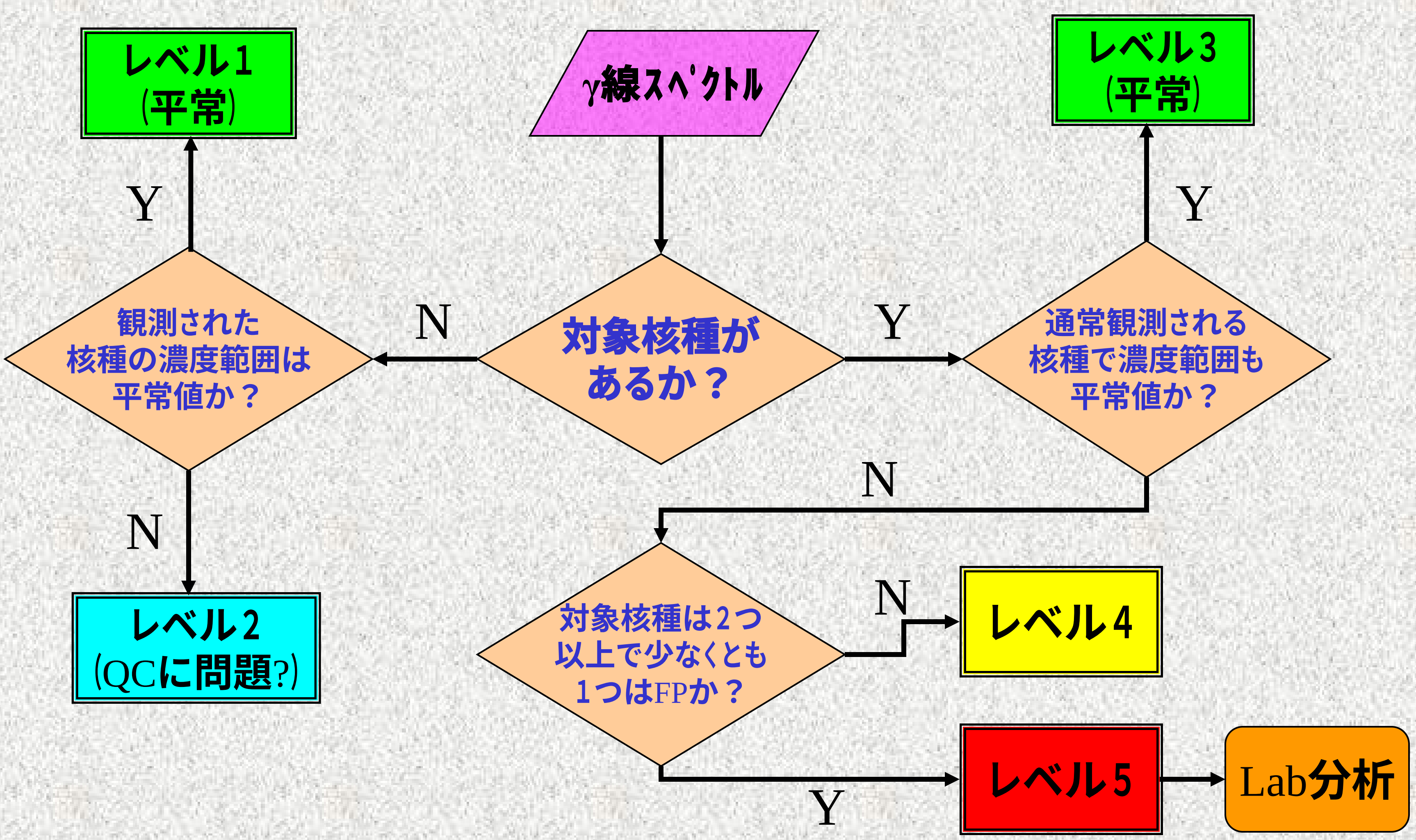


* 有意水準：統計検定において、帰無仮説が正しいにも拘わらず検知したと誤る確率

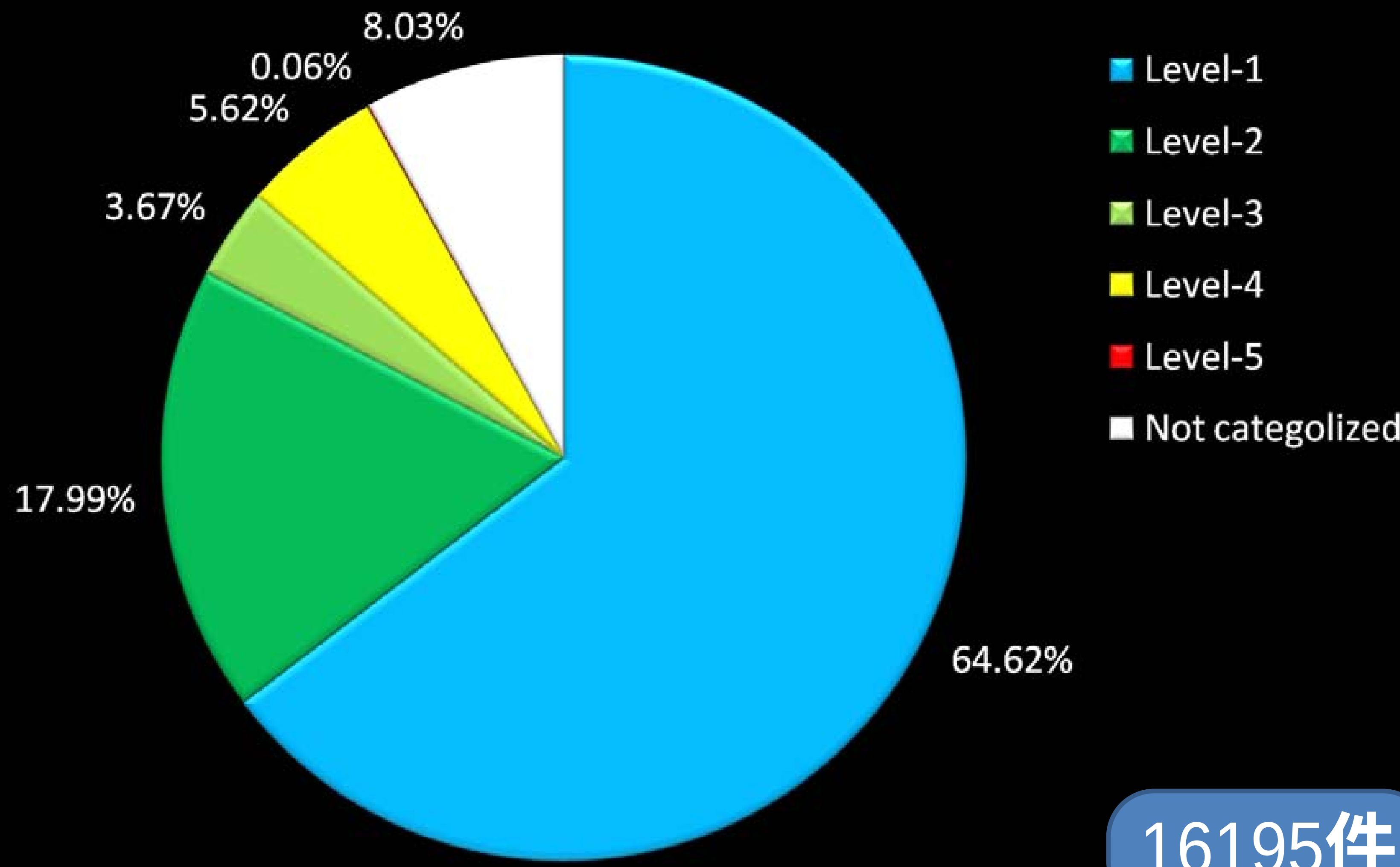
各観測所における^{133}Xeの濃度分布
－ Box-Whisker Plot－



放射性核種データの事象分別

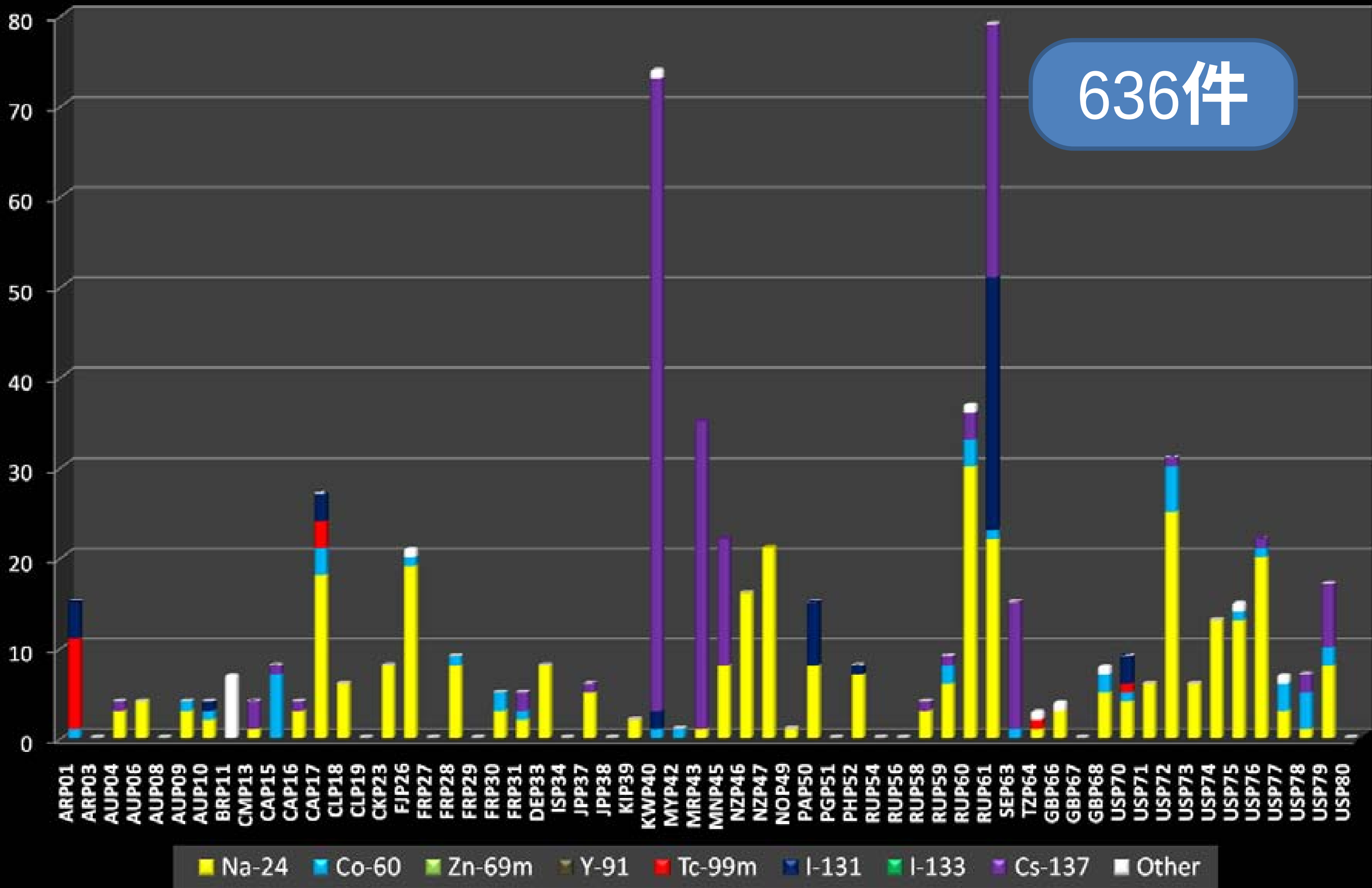


事象分別割合(2008年)

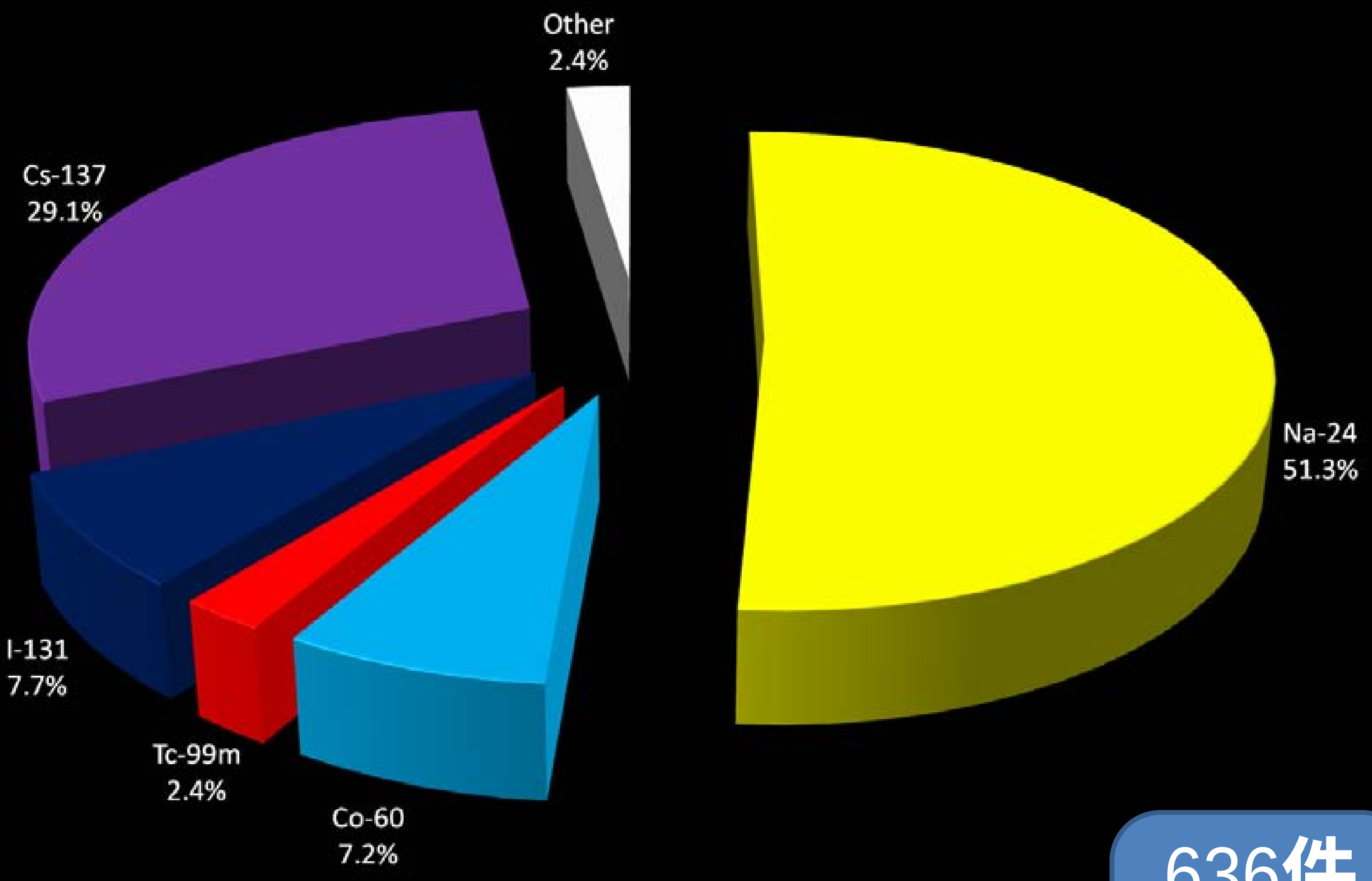


16195件

各観測所で検出された人工放射性核種
2009年 1月 1日～2009年 7月 4日



検出された人工放射性核種割合
2009年 1月 1日～2009年 7月 4日



636件

DPRK核実験 2006年10月（1）

- Ø放射性核種
  - REBをもとに大気輸送計算を実施
    放射性核種が到達する可能性のある観測所
    と到達予想時刻の推定
  - 観測所データの解析（通常より早い時間）
  - 希ガス観測データは、IDC報告には含まれていない
    → 各国の関心 → データ配信の開始（2007年6月）
  - 近隣観測所のフィルターを実験施設で詳細分析
    ØJPP37（沖縄）、JPP38（高崎）、USP71（ｱﾗｽｶ）

DPRK核実験 2006年10月 (2)

韓国とFOI (瑞) の対応

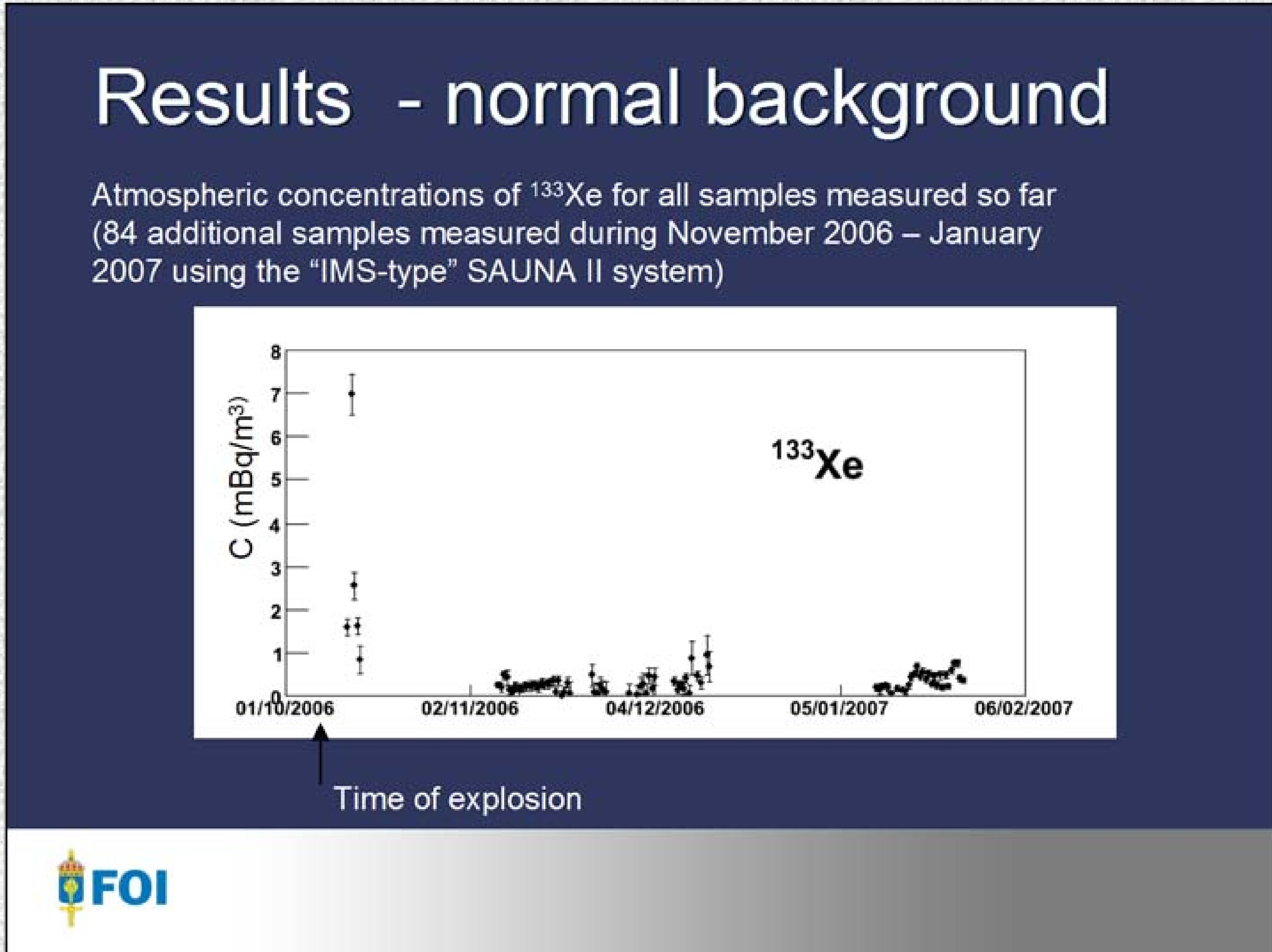
- 10月3日：DPRK、テレビで「核実験の用意」
- 4日：FOIと韓国が契約
- 8日：10/11にSAUNA-IIを韓国へ輸送することを決定
- **9日：DPRK、核実験実施**

  計画変更：韓国へ可搬型大気捕集器を持ち込み、
  試料をFOIへ持ち帰り分析
- 10日：韓国へ可搬型大気捕集器を搬送
- 11日：ATM計算により捕集位置を決定

  捕集開始(21:00UTC、核実験70時間後)
- 13日：最初の試料をFOIへ輸送

  17:00到着(現地時間)、直ちに分析開始
- 14日：最初の分析結果が出る
- 17日：残りの4試料をFOIへ輸送し分析
- 11月～：SAUNA-IIを韓国に持ち込み、バックグラウンド測定

DPRK核実験 2006年10月 (3)



韓国で10月11日～14日に捕集された希ガス５試料の分析結果

DPRK核実験 2009年5月

- Ø放射性核種 (CTBTOの対応)
  - – SEL/REBをもとに大気輸送計算を実施
    放射性核種が到達する可能性のある観測所
    と到達予想時刻の推定　→　毎日更新
  - – 観測所データの解析 (通常より早い時間)
  - – 近隣観測所のフィルターを実験施設で詳細分析
    - Ø JPP37 (沖縄) → NZL11 : 5/28 の大気捕集試料
    - Ø JPP38 (高崎) → USL16 : 5/29 の大気捕集試料
    - Ø JPP38 (高崎) → FIL07 : 5/31 の大気捕集試料
    - Ø RUP58 (露) → JPL11 : 5/30 の大気捕集試料
    - Ø PHP52 (ﾌｨﾘﾋﾟﾝ) → GBL15 : 5/29 の大気捕集試料
    - Ø PHP52 (ﾌｨﾘﾋﾟﾝ) → ARL01 : 5/30 の大気捕集試料

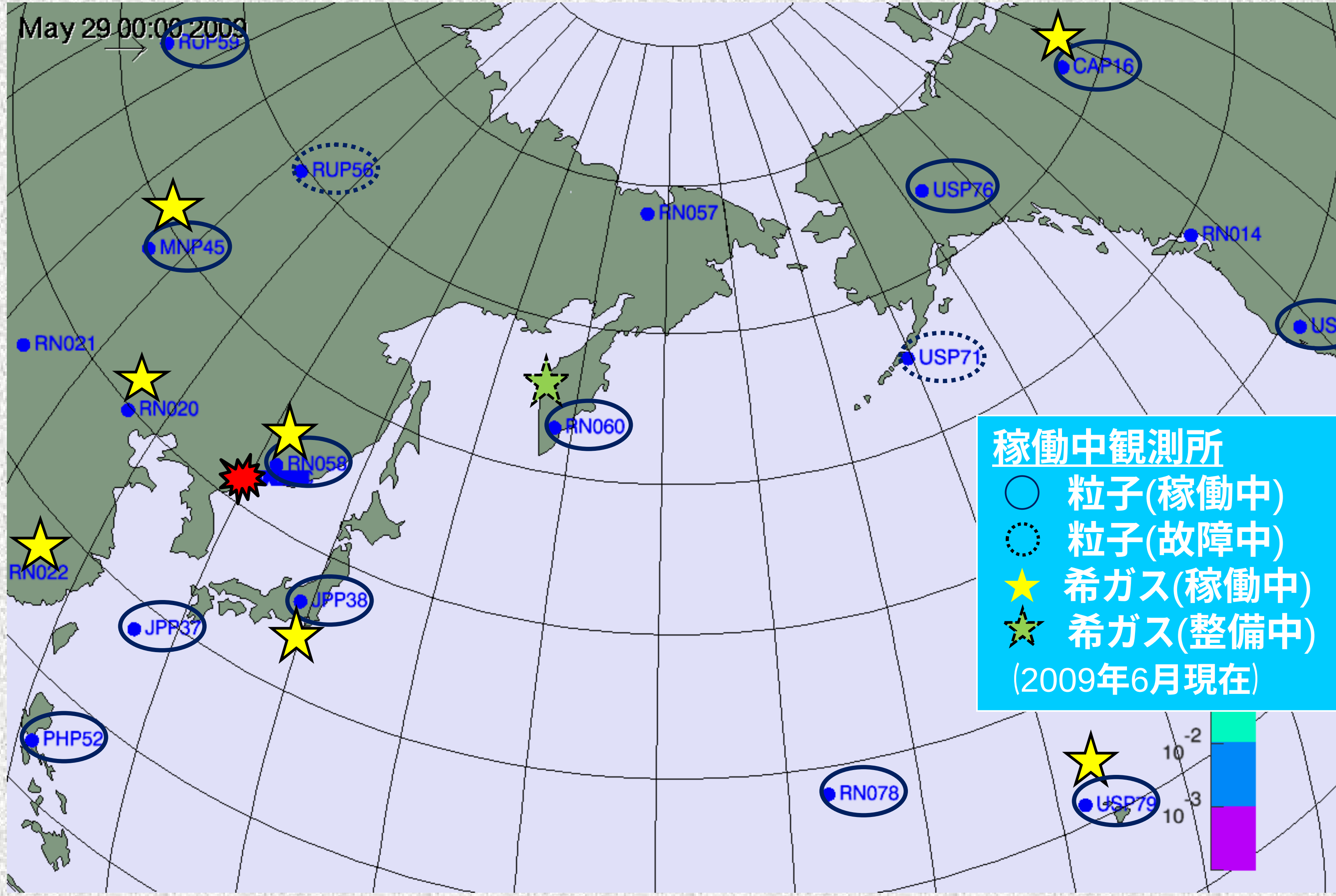
ATM-based estimate of RN Detections Update 6, status: 30-May-2009 afternoon

CTBTO PREPARATORY COMMISSION

Station	Name, Country	Earliest expected plume arrival >MDC(*)	CS date of pertaining sample	Earliest expected results	Distance (km)
JPP37	Okinawa, Japan	28 May 2009, 0 UTC	29 May 2009, 0 UTC	1 June 2009, noon	~1500
JPX38 JPP38	Gunma, Japan	28 May 2009, 15 UTC ECMWF analysis only US NCEP-> very weak	**Xenon** **28 May 2009, 21 UTC** Particulate 29 May 2009, 18 UTC	**Xenon** **30 May 2009, COB** Particulate 1 Jun 2009, noon	~1025
PHP52	Quezon City, Philippines	29 May 2009, 18 UTC	30 May 2009, 6 UTC	2 Jun 2009, noon	~3065
RUX58 RUP58	Ussuriysk, Russian Federation	30 May 2009, ECMWF: 03 UTC US NCEP: 00 UTC	**Xenon** **30 May 2009, 10 UTC** Particulate 31 May 2009, 0 UTC	**Xenon** **2 Jun 2009, morning** Particulate 3 Jun 2009, morning	~350

(*) Assuming a release of 10^{15} Bq, MDC(^{133}Xe) =0.2 mBqm^{-3}

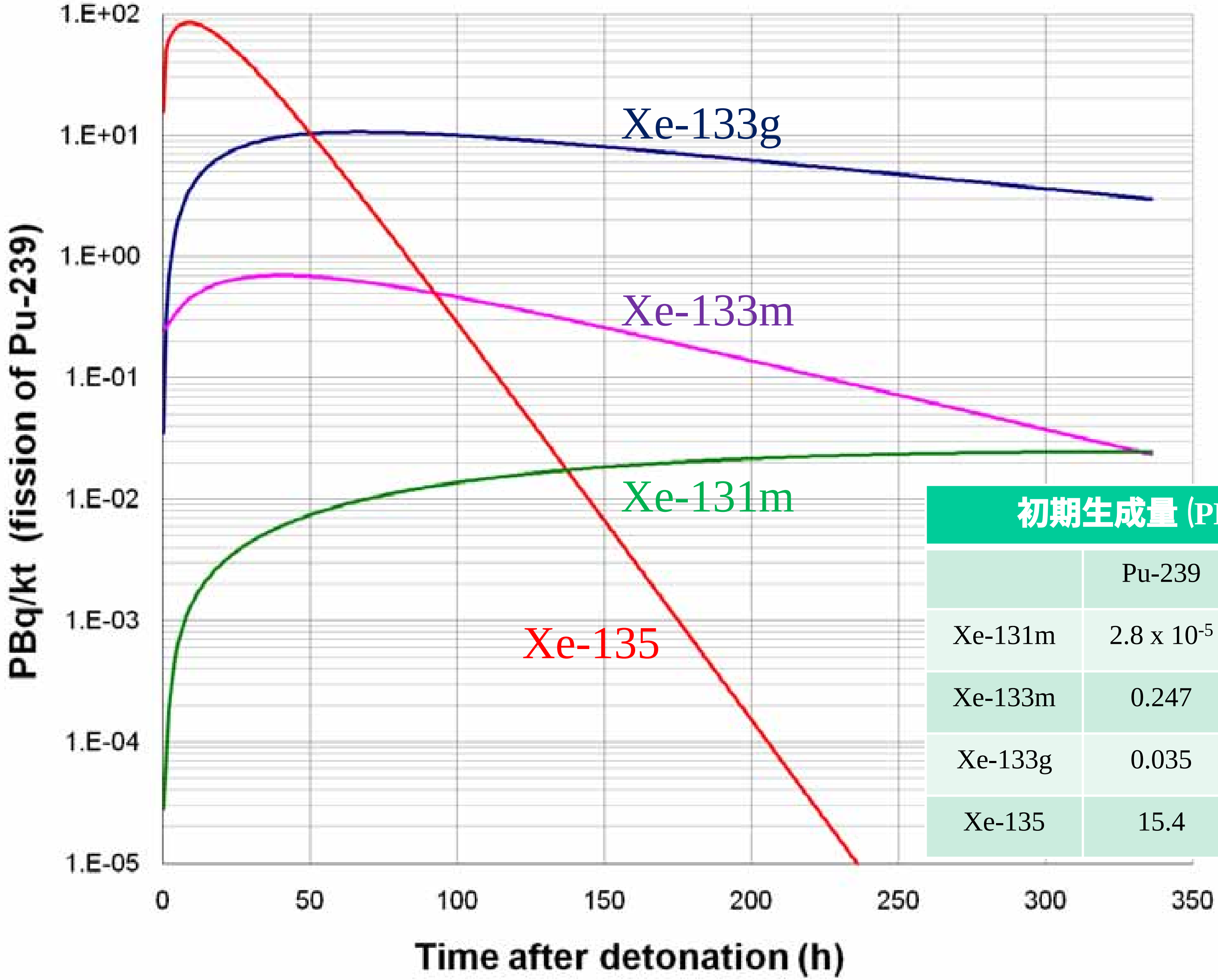
DPRK核実験に関連する放射性核種監視観測所



DPRK核実験 2009年5月

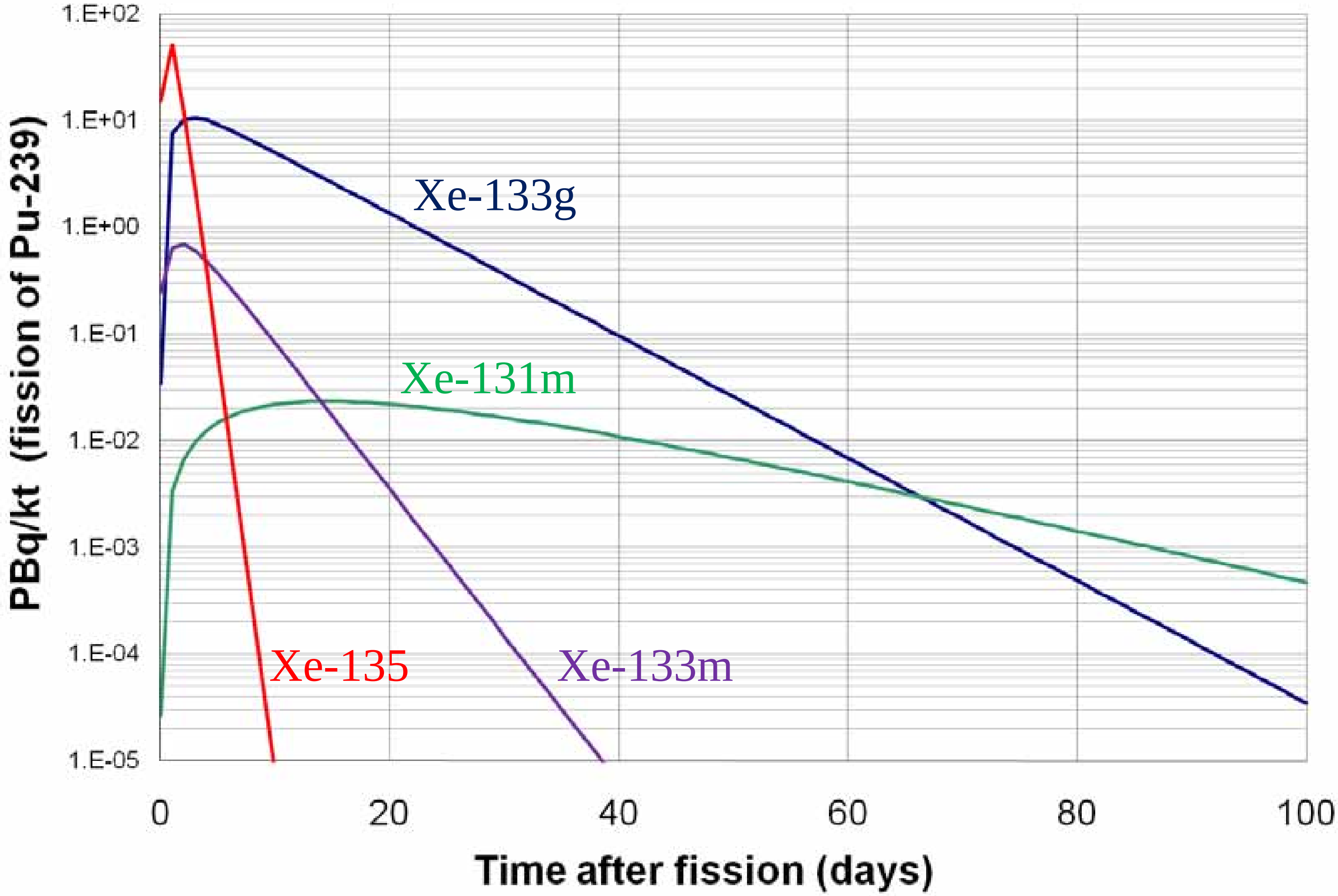
- 放射性核種（JAEAの対応）
  - NDC臨時体制でのデータ解析（3週間）
    - 粒子観測所：JPP37, JPP38, MNP45, PHP52, RUP58, RUP60
    - 希ガス観測所：CNX22, JPX38, RUX58
  - 震源地情報をもとに大気輸送計算を実施
  - 国内観測所（JPP37,JPP38,JPX38）の運用
  - 公認実験施設（JPL11）での試料詳細分析
  - Ar-37分析用試料の大気サンプリング

核実験後のXe同位体の時間変化（cavity内）



初期生成量（PBq/kt）		
	Pu-239	U-235
Xe-131m	2.8×10^{-5}	2.3×10^{-7}
Xe-133m	0.247	0.022
Xe-133g	0.035	0.0033
Xe-135	15.4	3.00

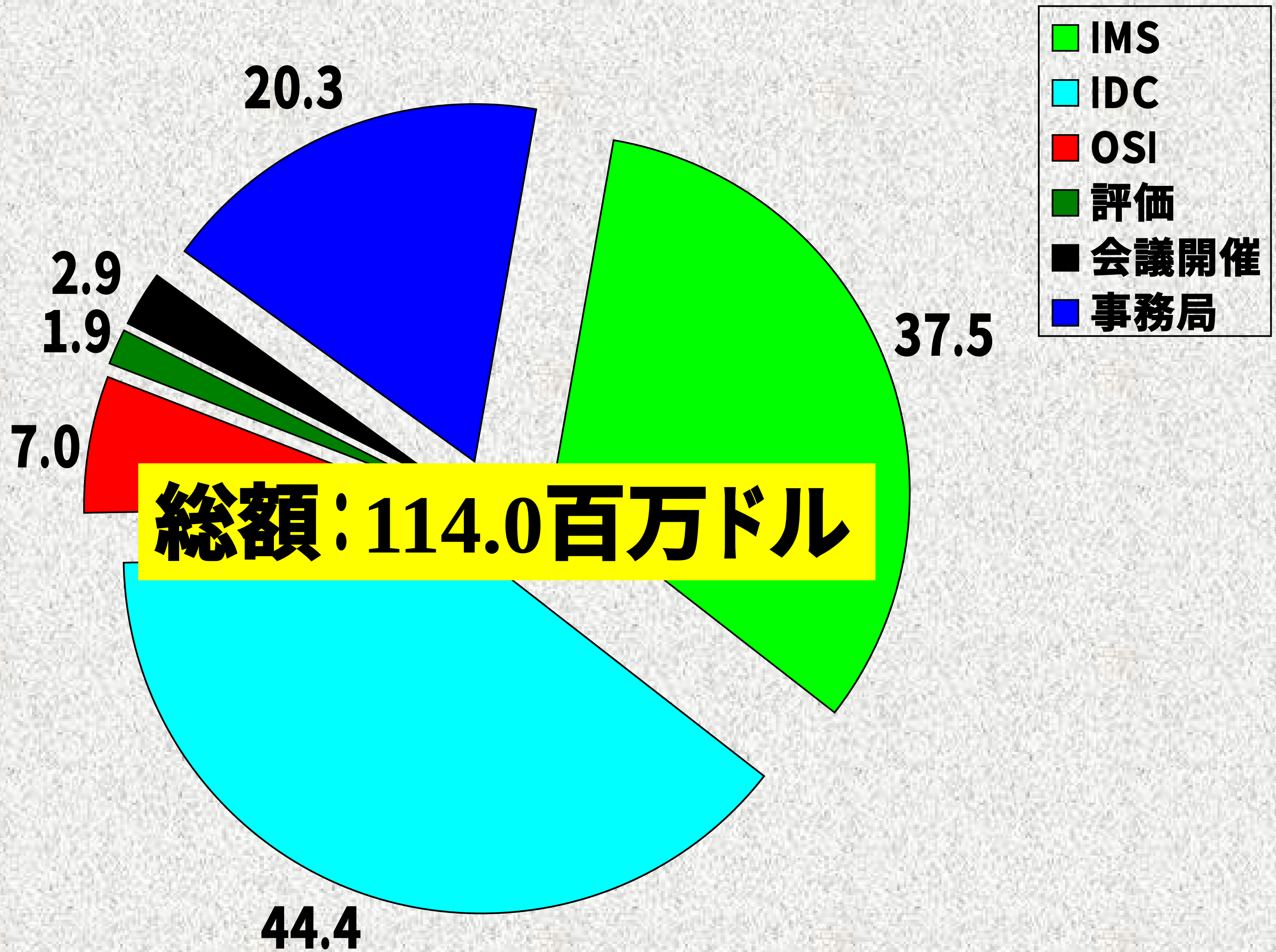
核実験後のXe同位体の時間変化（cavity内）



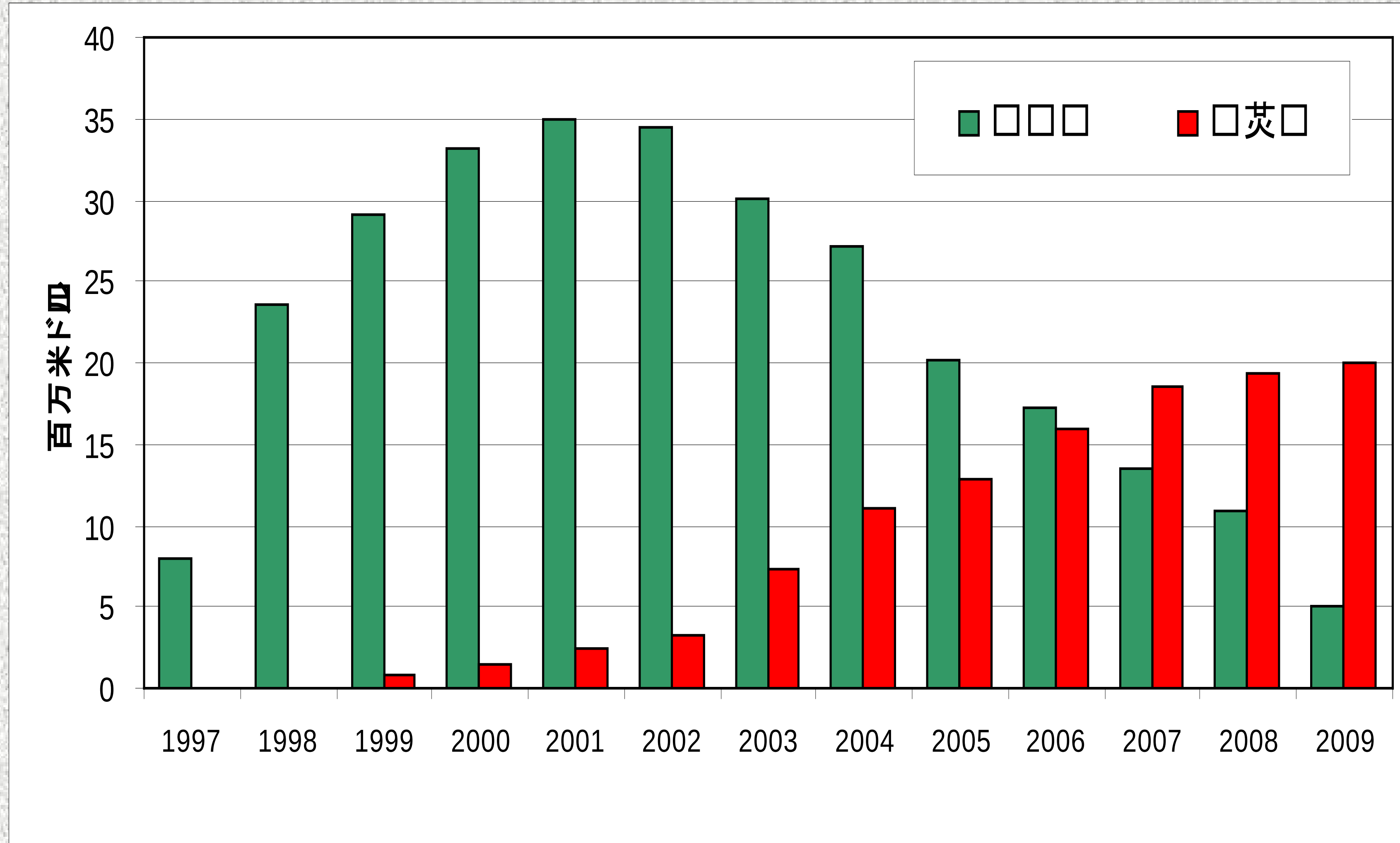
暫定的評価 2009年5月

- 得られた地震波形等から、明らかに自然地震ではなく、人工的爆発事象
- 震源位置は、前回（2006年10月）の核実験と誤差範囲内で一致
- 規模は、前回より大きく数キロトン程度と推定されている
- 核実験特有の放射性核種はCTBT国際監視制度において、いずれの観測所でも検知されていない（データの再評価は必要）
- 米国等のサンプリング専用機による試料の分析結果についても、放射性核種の検知は報告されていない
- 爆発直後の溶解岩石や崩落による放射性希ガスの偶然的閉じ込めも指摘されている
- 「核」ではない爆発（bluff/fake）も技術的可能性としてはありうるが、実際には非常に困難
- 今後、さらなる科学的検証が必要

2009年予算におけるプログラム配分（百万ドル）



IMS：整備段階から運用段階へ
－予算割合の推移－



CTBTO準備委の現在の課題
ー 署名開放後10年以上が経過して ー

- 想定されていなかった条約未発効期間の長期化
  - 国際監視ネットワーク：「整備段階」から「運用段階」へ
    - è 運用体制に合わせたPTS機構改革と財政規則の改定
    - è 10年経過した観測所機器等の更新
  - 条約未発効フェーズでの「運用」の位置づけ
    - è 準備委の役割は「EIFに向けた整備とそのための試験・評価」
    - è 一方、実質的な「核実験監視」能力が確立されつつある
    - è 今後、技術的、法的、財政的、政治的な検討が不可避
  - 当面の発効が見通せない状況での準備委の性格
- 技術革新に伴う検証技術のリフレッシュ
  - 条約に規定された技術の陳腐化
- 実質ゼロ成長予算下でのプログラム実施
- 国際監視ネットワークデータの民生・科学利用

Science and Technology (S&T)

- Ø 条約上の「科学諮問委員会 (SAB)」
  - 第2条パラ26(f)
  - 委員は個人資格で、科学技術分野の専門家
- Ø CTBT検証技術の向上
- Ø 科学技術、災害監視等に寄与
- Ø Scientific Communityとの交流
- Ø 研究者主導の枠組み
- Ø 各国ボランタリーベースのサポートプログラム

CTBT検証制度の波及効果
ー放射性核種監視技術（粒子、希ガス）ー

- 原子力施設のモニター（通常時、事故時）
- 気象データ、検出核種データの交換（WMOとの協力）
- 地球規模の放射性核種データを用いた大気環境モデルの構築
- 放射能放出源推定システムの構築
- バックグラウンドデータの地域的季節的変動の評価
- 宇宙線起源の大気中天然核種に係る地球規模での挙動解析
- 地球温暖化に係わる研究
- フィルター上に収集された物質、花粉等の系統的分析
- 放射線スペクトルデータ解析技術の開発・高度化

CTBT/IMSデータの民生/科学目的への応用

² IMSデータ　→　地球規模で毎日得られる品質管理の確立したデータ

- 2002年 5月　専門家会合 (英、CTBTOの共催)
  - IMSデータの民生/科学目的への応用
- 2002年 9月　CTBTフレンズ外相会合
  - 科学分野及び民生上の利益という観点からも、検証制度構築のための国際協力が重要
- 2002年10月　セミナー開催 (豪、日、蘭、英の共催)
- 2003年 9月　専門家会合 (ハンガリー、CTBTOの共催)
  - 基礎科学研究、環境防災への応用
- 2003年 9月　第3回CTBT発効促進会議
  - 民生・科学的応用の利益に関する理解促進
- 2004年 5月　セミナー開催 (日、独共催)
- 2006年 9月　CTBT科学シンポジウム (10周年記念)
  - 科学・産業分野との相互交流の促進

Thank you

CTBTO: For a safer and more secure world